



**Modélisation du rayonnement solaire pour la simulation  
des performances thermiques des Eco-bâtiments en Afrique  
Subsaharienne**

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGÉNIEUR 2iE AVEC  
GRADE DE

**MASTER EN GÉNIE ÉLECTRIQUE ET ÉNERGÉTIQUE**

**SPÉCIALITÉ : ÉNERGIE RENOUVELABLES**

-----

Présenté et soutenu publiquement le 23 Septembre 2020 par

**Iliassou SALOU NOUHOUN (20170440)**

**Directeur de mémoire : M. Adamah MESSAN**, Maître de conférences CAMES  
Responsable du Laboratoire Eco-Matériaux et Habitats Durables (LEMHaD, 2iE)

**Encadreur 2iE : Dr. Daniel YAMEGUEU**, Maître de Conférences  
Enseignant-chercheur en énergie renouvelable

**Structure d'accueil** : Laboratoire Eco-Matériaux et Habitats Durables (LEMHaD, 2iE)  
Laboratoire Energies Renouvelables et Efficacité Énergétique (LabEREE, 2iE)

Jury d'évaluation du stage :

Président : M. Yezouma COULIBALY, Maître de Conférences

Membres et correcteurs :

Dr.-Ing. Habil. Kokouvi Edem N'TSOUKPOE (HDR), Maître de Conférences  
M. Yezouma COULIBALY, Maître de Conférences  
Dr. Daniel YAMEGUEU NGUEWO, Maître de Conférences

**Promotion [2019/2020]**



## DÉDICACES

À mes parents,  
À ma sœur Nafissatou,  
À la cousine Salamatou.





## CITATION

« CHOISIS TOUJOURS LE CHEMIN QUI SEMBLE LE MEILLEUR MEME  
S'IL PARAIT PLUS DIFFICILE : L'HABITUDE LE RENDRA BIENTOT  
AGREABLE. »

PYTHAGORE





## REMERCIEMENTS

Je me fais un devoir d'exprimer ma profonde reconnaissance à Dieu le Tout-Puissant créateur et maître absolu, pour tous ses bienfaits tout au long de ce parcours. De plus, je voudrais exprimer ma gratitude aux personnes suivantes :

Que Monsieur Mady KOANDA, Directeur général de l'Institut 2iE, ainsi que toute son équipe trouve ici l'expression de ma vive reconnaissance pour les efforts continuels consentis pour notre formation.

J'adresse mes plus vifs remerciements au Professeur Moussa SORO, Chef de département Génie Électrique et Énergétique de l'Institut 2iE, pour sa forte implication tout au long de notre cursus de Master.

Grands remerciements au **Professeur Adamah MESSAN**, Maître de conférences, Enseignant-Chercheur à l'Institut 2iE et responsable du LEMHaD, qui a accepté m'accueillir au sein du LEMHaD en tant que stagiaire et qui n'a cessé de m'encourager tout au long de ce stage. Je vous remercie également pour la bienveillance avec laquelle vous avez dirigé cette recherche. Vos conseils m'ont été d'un apport inestimable ; vos conseils précieux ont nourri en profondeur ma réflexion et m'ont permis de mener ce projet à terme.

Je remercie vivement **Dr Daniel YAMEGUEU NGUEWO** qui a assuré mon encadrement durant ce stage et aussi durant ma formation au sein de cette école. Merci pour vos conseils et votre patience.

Toutes mes reconnaissances à M. **Ibrahim NEYA**, doctorant à 2iE pour sa grande disponibilité, sa patience et son admirable attention tout au long de cette étude.

Enfin, tous mes remerciements vont à ceux qui de près ou de loin ont apporté leur aide, M. Salif KABORE et mes collègues du LEMHaD. Je pense bien évidemment à mes collègues et amis Simon-Pierre, Emmanuel, Romaric et Carole.





## RESUME

La connaissance du gisement solaire en un site donné dépend de la disponibilité des appareils de mesure sur ce site ou à proximité. Or, le réseau météorologique est en général peu dense. L'objectif principal du présent travail consiste à modéliser et quantifier la densité de flux solaire incident sur les différentes façades d'un bâtiment bioclimatique, dans le but de concevoir un outil pouvant répondre au besoin d'estimation des gains solaires en Afrique subsaharienne. Une étude comparative des résultats obtenus par simulation à partir de trois modèles et de ceux mesurés a montré que, le modèle RETS2v5 proposé par Gueymard (2008) et celui de Bird (1981) permettent de mieux prédire le rayonnement solaire dans notre contexte d'étude. Les résultats obtenus avec ces deux modèles montrent une forte corrélation du coefficient de détermination  $R^2$  de 0,99 en moyenne pour chacun. Par ailleurs, le logiciel Matlab est utilisé pour créer un outil composé de 4 algorithmes. L'algorithme SPA proposé par Reda et Andrea (2004) a été utilisé pour le calcul de la position du soleil avec une erreur de 0,0003°. Le modèle RETS2v5 a été utilisé pour la prédiction des composants du rayonnement solaire direct, diffus et global horizontal. L'algorithme de Perez (1990) a été utilisé pour le calcul du rayonnement diffus sur les parois inclinées. Enfin, l'algorithme reindl2 développé par Reindl et al (1990) est proposé pour l'extraction de la composante diffuse du global pour des utilisateurs disposant des données du rayonnement global. Par ailleurs, les simulations numériques ont permis de comparer l'évolution de flux solaire durant une journée complète sur les parois verticales Sud, Est, Nord, Ouest et toiture d'un bâtiment pilote. Les résultats montrent différentes proportions de rayonnements variables suivant la position des parois avec un fort potentiel pour la toiture allant jusqu'à 900 W/m<sup>2</sup>. Afin de contribuer à la validation énergétique des bâtiments pilotes de 2iE, une étude d'influence d'ombrage sur des bâtiments pilotes est proposée par simulation 3D et thermographie. On a pu constater que l'ombre portée par ces bâtiments diminue de 15 % le rayonnement reçu par une paroi.

Mots Clés :

- 
- 1- Algorithme
  - 2- Modèle de calcul
  - 3- Interface GUI
  - 4- Position du soleil
  - 5- Rayonnement solaire



## ABSTRACT

The knowledge of the solar potential at a given site depends on the availability of measuring devices at or near that site. However, the weather network is generally not very dense. The main objective of this work is to model and quantify the incident solar flux density on the different facades of a bioclimatic building, in order to design a tool that can meet the need for estimating solar gains in sub-Saharan Africa. A comparative study of the results obtained by simulation from three models and those measured showed that the RETS2v5 model proposed by Gueymard (2008) and that of Bird (1981) makes it possible to better predict solar radiation in our study context. The results obtained with these two models show a strong correlation of the  $R^2$  coefficient of determination of 0.99 on average for each. In addition, the Matlab software is used to create a tool composed of 4 algorithms. The SPA algorithm proposed by Reda and Andrea (2004) was used to calculate the position of the sun with an error of  $0.0003^\circ$ . The RETS2v5 model was used to predict the components of direct, diffuse and global horizontal solar radiation. The algorithm of Perez (1990) was used for the calculation of scattered radiation on sloping walls. Finally, the reindl2 algorithm developed by Reindl et al (1990) is proposed for the extraction of the diffuse component of the global for users with global radiation data. In addition, numerical simulations were used to compare the evolution of solar flux over a full day on the vertical walls of a pilot building (South, East, North, West and roof). The results show different proportions of varying radiation depending on the position of the walls with a high potential for the roof up to  $900 \text{ W/m}^2$ . In order to contribute to the energy validation of 2iE pilot buildings, a study of the influence of shading on pilot buildings is proposed by 3D simulation and thermography. It has been observed that the shadow cast by these buildings reduces the radiation received by a wall by 15%.

### Keywords

---

- 1- Algorithm
- 2- Calculation model
- 3- GUI interface
- 4- Sun's position
- 5- Solar radiation



## LISTE DES ABRÉVIATIONS

Angles		
$\phi$	Latitude (degrés), nord positif	[°]
$\lambda$	Longitude du lieu (degrés)	[°]
$\omega$	Angle horaire (degrés), midi zéro solaire et matins positifs	[°]
$\beta$	Inclinaison d'une surface par rapport à la position horizontale (degrés)	[°]
$\gamma$	Azimut d'une surface inclinée par rapport à la position du soleil (degrés)	[°]
$\delta$	Déclinaison, nord positif, sud négatif	[°]
$\theta_z$	Angle entre le rayonnement direct et la normale à une surface considérée.	[°]
$\alpha_s$	Hauteur ou altitude du soleil	[°]
Coefficients d'atténuation du rayonnement solaire		
$m_g$	Coefficient de transmission après la diffusion par les gaz uniformes	[-]
$m_o$	Coefficient de transmission après absorption par l'ozone	[-]
$m_w$	Coefficient de transmission après absorption par la vapeur d'eau	[-]
$m_a$	Coefficient de transmission après la diffusion par les aérosols.	[-]
$E_o$	Facteur de correction de l'excentricité de l'orbite terrestre	[-]
$U_3$	Longueur de parcours optique relative de l'ozone à une température T	[-]
$\alpha_0$	Coefficient d'absorption par la couche d'ozone	[-]
$\omega_0$	Fraction albédo à diffusion unique	
$\varepsilon$	Clarté du ciel (Perez)	[-]
kt	Indice de clarté (mesure des conditions atmosphériques)	[-]
Radiométrie		
$G_{sc}$	Rayonnement solaire extra-atmosphérique	[W/m <sup>2</sup> ]
$I_{dm}$	Le rayonnement diffus issu du phénomène de multi réflexion terre- Atmosphère	[W/m <sup>2</sup> ]



## Modélisation du rayonnement solaire pour la simulation des performances thermiques des Eco-bâtiments en Afrique subsaharienne

GHI	Rayonnement global sur un plan horizontal	$[W/m^2]$
DNI	Rayonnement direct nominal sur un plan horizontal	$[W/m^2]$
DHI	Rayonnement diffus sur un plan horizontal	$[W/m^2]$
$I_{dT}$	Rayonnement diffus sur un plan incliné	$[W/m^2]$
$I_{dr}$	L'irradiation diffuse provenant de la diffusion de Rayleigh	$[W/m^2]$
$I_{da}$	L'irradiation diffuse provenant de la diffusion par les aérosols	$[W/m^2]$
$\lambda_1$	Longueur d'onde	$[\mu m]$
$I_{g \text{ estimé}}$	Rayonnement global estimé	$[W/m^2]$
$I_{g \text{ mesurée}}$	Rayonnement global mesuré	$[W/m^2]$
<b>Mètres</b>		
$z$	L'altitude du site considéré en mètre en (m)	$[m]$
$S$	Superficie de la surface réceptrice du rayonnement solaire	$[m^2]$
<b>Abréviation</b>		
2iE	Institut International de l'Eau et de l'Environnement	-
NREL	National Renewable Energy Agency	-



## SOMMAIRE

<b>DÉDICACES</b> .....	<b>I</b>
<b>CITATION</b> .....	<b>II</b>
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>III</b>
<b>RESUME</b> .....	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>LISTE DES ABRÉVIATIONS</b> .....	<b>VI</b>
<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>1</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>3</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>4</b>
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b> .....	<b>5</b>
<b>I.1 CONTEXTE ET JUSTIFICATION</b> .....	<b>5</b>
<b>I.2 OBJECTIFS DE L'ETUDE</b> .....	<b>6</b>
<b>I.3 STRUCTURE D'ACCUEIL</b> .....	<b>6</b>
I.3.1 Présentation du LEMHaD .....	7
I.3.2 Présentation du LabEREE .....	7
<b>CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE</b> .....	<b>8</b>
<b>I.1 RAYONNEMENT SOLAIRE</b> .....	<b>8</b>
I.1.1 Interaction du rayonnement solaire avec l'atmosphère .....	9
I.1.2 Atténuation du rayonnement solaire par l'atmosphère.....	9
I.1.3 Rayonnement solaire reçu sur terre par un bâtiment .....	10
I.1.4 Géométrie solaire.....	11
<b>I.2 MESURE ET METHODE D'ESTIMATION DE LA RESSOURCE SOLAIRE</b> .....	<b>12</b>
I.2.1 Techniques de mesure de l'irradiance solaire .....	12
I.2.2 Techniques de modélisation du rayonnement solaire.....	13
I.2.2.1 Modèles existants .....	13
I.2.2.2 Estimation du rayonnement direct et diffus sur un plan incliné.....	17
I.2.2.3 Outil de calcul thermique et Simulation thermique dynamique dans le bâtiment.....	18
<b>CHAPITRE II : MATÉRIELS ET MÉTHODES</b> .....	<b>20</b>



<b>I.1</b>	<b>MATERIELS.....</b>	<b>20</b>
I.1.1	Plateforme expérimentale des bâtiments pilotes de 2iE .....	20
I.1.2	Outils de programmation et simulation .....	20
I.1.3	Sites et base de données des mesures expérimentales du rayonnement solaire .....	21
<b>I.2</b>	<b>METHODOLOGIE .....</b>	<b>22</b>
I.2.1	Modélisation du rayonnement solaire et création d’interface graphique .....	22
I.2.1.1	Modèle de prédiction de la position du soleil.....	22
I.2.1.2	Modèle de calcul du rayonnement solaire sur un plan horizontal .....	22
I.2.1.3	Calcul du rayonnement diffus sur un plan incliné.....	24
I.2.1.4	Indicateurs de performance .....	25
I.2.1.5	Algorithme de calcul de la position du soleil et du rayonnement solaire.....	26
I.2.2	Méthodologie de simulation d’ombres des bâtiments pilotes .....	27
<b>CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS .....</b>		<b>28</b>
<b>I.1</b>	<b>ÉTUDE COMPARATIVE DES MODELES ET ANALYSE CRITIQUE.....</b>	<b>28</b>
<b>I.2</b>	<b>INTERFACE GRAPHIQUE DEVELOPPER POUR L’OUTIL DE CALCUL ET DE PREDICTION DU RAYONNEMENT SOLAIRE .....</b>	<b>31</b>
I.2.1	Présentation succincte des deux interfaces graphiques .....	33
<b>I.3</b>	<b>SIMULATION NUMERIQUE DU RAYONNEMENT GLOBAL SUR LES PAROIS BIOCLIMATIQUES .....</b>	<b>34</b>
I.3.1	Modèle d’extraction du rayonnement diffus du global .....	37
<b>I.4</b>	<b>SIMULATION D’OMBRE DES BATIMENTS PILOTES.....</b>	<b>38</b>
I.4.1	Simulation thermographie sur les bâtiments .....	39
<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....</b>		<b>40</b>
<b>RECOMMANDATIONS.....</b>		<b>42</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>		<b>43</b>
<b>LISTES DES ANNEXES .....</b>		<b>47</b>



## LISTE DES TABLEAUX

### CHAPITRE I

**Tableau I.1:** Spécificités des algorithmes SPA, SG, MICH, ENEA et SG2 (Chauvin, 2016) 11

### CHAPITRE II

**Tableau II.1**Caractéristiques géographique du site et Période d'enregistrement des données 21

**Tableau II.2** Variable d'entre des modèles CSI pour le calcul des DHI, DNI et GHI. .... 23

**Tableau II.3 :** Indicateurs de performance ..... 25

### CHAPITRE III

**Tableau III.1**Comparaison statistique des performances des trois modèles sur base du GHI 29

**Tableau III.2**Période d'influence d'ombrages des bâtiments ..... 38



## LISTE DES FIGURES

### Chapitre I

<b>Figure I.1:</b> (a) Spectre électromagnétique du rayonnement solaire (b) Dispersion atmosphérique du rayonnement solaire (De Herde and Liébard, 2005) .....	8
<b>Figure I.2</b> Position du soleil relative à un bâtiment et composante du rayonnement solaire ..	10
<b>Figure I.3</b> Appareil classique de mesure du rayonnement solaire sur terre (Blanc et Wald, 2015)	12
<b>Figure I.4</b> Carte de la ressource solaire en Afrique subsaharienne et le Burkina Faso (“Free Maps and GIS data / Overview   Solargis,” 2019.) .....	13
<b>Figure I.5</b> Indice de clarté kt en fonction des conditions atmosphériques .....	16

### Chapitre II

<b>Figure II.1 :</b> a) Bâtiments Pilotes, b) Position actuelle des 3 bâtiments pilotes.....	20
Figure II.2 : Station Météo de 2iE.....	21
Figure II.3 Organigramme du programme de calcul du rayonnement solaire proposé .....	26

### Chapitre III

<b>Figure III.1</b> Courbes comparatives de l'évolution du GHI mesuré et simulé de 4 périodes de l'année	28
<b>Figure III.2</b> Interface graphique proposée pour le calcul de la position du soleil et des angles d'incidence de différentes orientations.....	31
<b>Figure III.3</b> Interface graphique proposer pour la prédiction du rayonnement solaire et l'extraction du rayonnement diffus.....	32
<b>Figure III.4</b> Évolution de la densité des flux solaire sur les parois EST et OUEST .....	34
<b>Figure III.5</b> Évolution de la densité des flux solaire sur les parois NORD et SUD .....	35
<b>Figure III.6</b> Évolution de la densité des flux solaire sur les parois de la toiture .....	36
<b>Figure III.7</b> a) DNI extraite et calculés par RETS2v5, b) Rayonnement global calculé par les données réelles.	37
<b>Figure III.8</b> a) Ombre simulée en 3D par Sun Path le 19/02/2020 à 7h :23 min, b) Bâtiment 1 Ombre observer sur site le 19/02/2020 à 7h :23 min.....	38
<b>Figure III.9</b> Image thermographique d'un seul bâtiment simulé.....	39



## INTRODUCTION GÉNÉRALE

### I.1 Contexte et justification

La Terre reçoit chaque année une énergie de  $1,6 \cdot 10^{18}$  kWh, alors que les besoins énergétiques annuels mondiaux représentent environ  $1/6000^{\text{ème}}$  de l'énergie rayonnée par le Soleil (Multon, 1998). Cependant, si le développement des technologies d'énergie renouvelable joue un rôle crucial pour assurer un développement énergétique durable à long terme, la chaleur excessive issue des flux solaires, notamment dans les régions à climat chaud et semi-aride demeure une source d'inconfort. En effet, dans la plupart des pays subsahariens comme le Burkina Faso ou le Niger, la charge de refroidissement actif des bâtiments climatisés représente une grande partie de la consommation globale d'énergie, soit 60 à 80 % de celle-ci (Coulibaly, 2019; Gado et al., 2018). Dans de nombreux bâtiments, les gains de chaleur des murs extérieurs et des toits constituent une part importante de la charge de refroidissement totale. Dans les logements sous toiture, 25 % des apports solaires thermiques sont transmis par les façades. Pour les logements à étage intermédiaire, ce taux atteint 50 % (HAMDANI, 2011). De plus, l'intensité de la radiation solaire est l'un des éléments les plus importants qui participent à la détermination des formes et l'orientation des bâtiments dans les climats chauds et semi-arides. On comprend dès lors l'importance de la protection des façades les plus exposées au Soleil. Dans la littérature, plusieurs travaux de recherche traitent de ce sujet. Ainsi, l'accent est principalement mis sur l'idée d'une architecture bioclimatique qui adopte des solutions passives ou semi-passives pour l'atteinte du confort thermique. Par ailleurs, quelques auteurs passent par la production architecturale d'édifice ayant une meilleure performance énergétique vis-à-vis des conditions climatiques (Zeroual, 2006). Des recherches révèlent que les bâtiments bioclimatiques consomment 5 à 6 fois moins d'énergie que les bâtiments conventionnels au cours de leur durée de vie (Chuayb, 2015). Gallauziaux et Fedullo en 2010 démontrent que capter et maîtriser les apports solaires sont des éléments incontournables de la conception bioclimatique (Gallauziaux et Fedullo, 2010). Cela nécessite donc le recours aux modèles numériques et aux outils de simulation qui constituent des moyens raisonnables, en termes de délai et coût, pour analyser et comprendre le comportement des bâtiments afin d'améliorer les performances énergétiques que ce soit en phase de conception ou pendant l'utilisation. Néanmoins, force est de constater que dans la plupart des pays en voie de développement, la disponibilité des données de mesures météorologiques de l'éclairement solaire et leur fiabilité restent un défi (Babikir et al., 2020; GUENGANE et al., 2019; N'Gobi et al., 2018.). Ce mémoire vise à apporter une contribution dans ce sens.

## **I.2 Objectifs de l'étude**

Le Laboratoire Eco-Matériaux et Habitat Durable (LEMHaD) de l'institut 2iE dispose d'une plateforme expérimentale sur les bâtiments composée de trois bâtiments pilotes. Ces bâtiments pilotes permettent l'étude des performances énergétiques des matériaux utilisés suivant les modes locaux de construction. L'objectif est de réaliser des bâtiments bioclimatiques en milieu tropical à partir de matériaux locaux qui exploitent au mieux les ressources naturelles comme le soleil et le vent pour satisfaire le confort thermique des occupants à un coût abordable. La présente étude consiste à modéliser et déterminer la quantité effective de la densité du flux solaire incident sur les différentes façades d'un des bâtiments pilotes de 2iE.

L'objectif global étant de réaliser avec le logiciel Matlab un outil pour répondre aux besoins d'estimation des gains solaires. Ce travail est une composante d'un projet de recherche plus large dont le but est de constituer un outil de simulation adapté à notre contexte africain.

Ce mémoire s'articule autour de trois (3) chapitres :

- ✚ Le premier chapitre est une synthèse des travaux présents dans la littérature qui traitent des modèles et méthodes de quantification des gains solaires et des outils de simulation dans le secteur du bâtiment.
- ✚ Le deuxième chapitre décrit les matériels et méthodes consacrés aux calculs du rayonnement incident et à la simulation d'ombres portées par les bâtiments pilotes de 2iE.
- ✚ Le troisième chapitre est composé de trois parties.
  - La première partie est consacrée à une étude comparative entre trois modèles de prédiction du rayonnement solaire.
  - La deuxième partie présente les résultats de simulation numérique des calculs du rayonnement solaire incident sur les parois des bâtiments pilotes de 2iE.
  - La dernière partie est consacrée aux résultats liés à la simulation d'ombres portées par les bâtiments pilotes.

## **I.3 Structure d'accueil**

Ce travail de mémoire s'est déroulé au niveau de deux laboratoires de 2iE à savoir le Laboratoire Eco-Matériaux et Habitat Durable (LEMHAD) et le Laboratoire Energies Renouvelables et Efficacité Énergétique (LabEREE).



### I.3.1 Présentation du LEMHaD

Le Laboratoire Eco-Matériaux et Habitat durable (LEMHaD) fait partie de la Direction de la Recherche de l'Institut International d'Ingénierie (2iE) de Ouagadougou. Son but est de contribuer à résoudre les problèmes d'insuffisance de logements accessibles et confortables pour les populations en Afrique et d'infrastructures de transport de qualité et durable, par le développement de solutions innovantes respectueuses de l'environnement et il intervient dans les secteurs d'activité dédiés au conseil et à l'ingénierie dans les domaines des matériaux de construction, de la durabilité des ouvrages, de la thermique du bâtiment, de la géotechnique et des enrobés.

Les principaux axes de recherche de ce laboratoire sont :

- Conception, optimisation, caractérisation et durabilité des matériaux de construction  
Dans cet axe, il est question d'élaborer des Eco-matériaux et de déterminer les paramètres thermiques mécaniques et physique développé à l'aide de produits divers au sein du laboratoire ou non.
- Comportement mécanique des structures et habitats durables.  
Dans cet axe, il est question de déterminer le comportement mécanique des structures mixtes : (terre/bois bois/béton-bois/acier-béton/acier), développer des méthodologies de dimensionnement appropriées des structures mixtes concevoir et caractériser des solutions de confort thermiques pour des écohabitats.

### I.3.2 Présentation du LabEREE

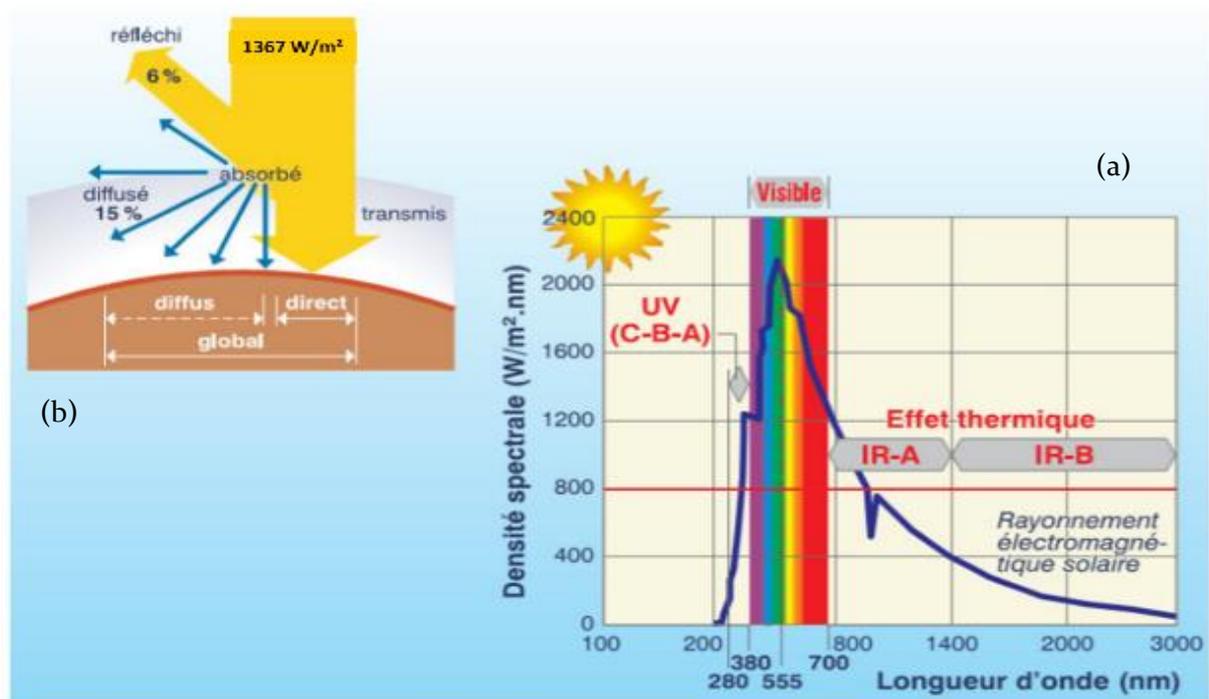
Le LabEREE est le laboratoire Energies Renouvelables et Efficacité Énergétique. Ses objectifs sont entre autres le développement de solutions innovantes adaptées aux besoins énergétiques des pays africains à travers les énergies renouvelables, l'optimisation des systèmes de production d'énergie, la recherche de solutions optimales en matière d'intégration énergétique pour une valorisation efficace des ressources localement disponibles. Il se concentre sur deux axes de recherches à savoir : Énergie solaire et réseaux intelligents (ESRI), et Valorisation Énergétique de la Biomasse (VALBIO). Il est constitué de trois professeurs associés, de sept enseignants-chercheurs, de trois enseignants, de deux techniciens de laboratoire, d'un assistant d'enseignement et de recherche et de dix doctorants. Il possède des partenaires scientifiques (Cirad, UCL, etc.), des partenaires industriels (TOTAL, SONABEL, etc.) et des ONG telles que Woord en Daad.

## CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Dans ce chapitre, nous présenterons, tout d'abord, un état de l'art des notions essentielles de la ressource solaire, tant au niveau de son estimation que de sa prévision. Ensuite nous aborderons les outils et modèles existants pour en faire la prévision. Enfin, nous terminerons ce chapitre par les outils de simulation thermique dans le bâtiment et quelques difficultés liées à leur utilisation.

### I.1 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire, sous sa forme lumineuse, permet de voir en journée, mais surtout il se convertit en chaleur lorsqu'il entre en contact avec une matière opaque, qu'il s'agisse de la peau humaine, du sol ou d'un mur. En effet, le rayonnement solaire est défini comme l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil. Il est composé de toute la gamme des rayonnements électromagnétiques. Cela va des ondes radio aux rayons gamma, en passant par les ultraviolets (UV) et la lumière visible (VIS), etc. La lumière visible représente 46 % de l'énergie totale émise par le soleil. Quarante-neuf pour cent de l'énergie rayonnante du soleil se situe en dessous du rouge visible, dans la gamme des infrarouges. C'est ce rayonnement que nous ressentons comme une vague de chaleur. Le reste du rayonnement solaire, l'ultraviolet, représente tout le rayonnement de longueur d'onde inférieure à celle de l'extrémité violette du spectre visible. (Figure I.1-a).



**Figure I.1** : (a) Spectre électromagnétique du rayonnement solaire (b) Dispersion atmosphérique du rayonnement solaire (De Herde et Liébard, 2005)



En considérant comme exemple les fenêtres d'un bâtiment, de ces trois composants majeurs, la lumière visible (VIS) offre toujours des avantages aux occupants intérieurs et favorise les économies d'énergie en rapport avec l'éclairage électrique, tandis que l'infrarouge solaire est bénéfique pour les économies d'énergie des bâtiments en période de fraîcheur, mais indésirable en temps de chaleur (Eicker, 2006). Il convient donc de faire une présentation succincte des composants principaux qui influent sur le rayonnement solaire.

### **I.1.1 Interaction du rayonnement solaire avec l'atmosphère**

L'atmosphère terrestre est une couche de gaz et de particules qui entoure notre planète Terre et est retenue par la gravité terrestre. A la limite de l'atmosphère, l'intensité du RS (Rayonnement solaire) est appelée rayonnement extra-atmosphérique ou la constante solaire  $G_{sc}$  et est égale à  $1367 \text{ W/m}^2$  (Iqbal, 2012) . Il varie au cours de l'année puisque la distance terre-soleil elle-même varie. Jusqu'au début des années 90, la constante solaire était alors estimée aux environ de  $(1366 \pm 7) \text{ W/m}^2$ . Récemment, Gueymard réévalua cette constante et obtint la valeur de  $1366,1 \text{ W/m}^2$  avec une incertitude de  $0,5 \text{ W / m}^2$  tout en prenant en compte les progrès de la radiométrie spatiale intervenus depuis le début des années 2000 (Gueymard, 2018).

### **I.1.2 Atténuation du rayonnement solaire par l'atmosphère**

Le rayonnement solaire incident sur l'atmosphère terrestre est relativement constant. Cependant, à la surface de la Terre il varie considérablement en raison des effets atmosphériques comme l'absorption, la diffusion et les variations locales de l'atmosphère, telles que la vapeur d'eau, les nuages, la pollution, la saison de l'année et l'heure de la journée, etc. En conséquence, lorsque le rayonnement solaire pénètre dans l'atmosphère, il est affaibli par absorption, réflexion et est partiellement converti par dispersion en irradiance diffuse (Figure I.1-a). Ce processus est à l'origine des composantes directes et indirectes (diffuses) du rayonnement solaire reçu par un observateur au sol.

✚ L'absorption du rayonnement solaire par l'atmosphère terrestre est sélective. Quatre composants sont principalement responsables de cette absorption : l'ozone, l'oxygène, le gaz carbonique et la vapeur d'eau. L'ozone permet de former un écran arrêtant les UV ( $\lambda < 280 \text{ nm}$ ). L'oxygène absorbe certaines bandes étroites du visible. Le gaz carbonique absorbe essentiellement dans le lointain infrarouge. En fin de compte, la vapeur d'eau vient absorber de nombreuses bandes spectrales, principalement localisées dans l'infrarouge.

✚ La diffusion atmosphérique du rayonnement solaire se produit lors de son passage au travers de l'atmosphère par l'interaction avec les molécules d'air, d'eau (vapeur et gouttelettes),





### **I.1.4 Géométrie solaire**

Dans toutes les études sur le rayonnement solaire, une première étape clé consiste à déterminer précisément la position apparente du disque solaire par rapport à l’observateur. Le calcul de la géométrie solaire implique la connaissance de plusieurs angles dans les plans écliptiques et équatoriaux, l’angle d’inclinaison de la surface réceptrice, le plan de la trajectoire apparente du soleil et les relations trigonométriques entre tous les angles. Pour une surface horizontale ou verticale, la position du soleil est déterminée principalement par son angle zénithal  $\theta_z$ , et son azimut  $\gamma_s$ . Dans ce cas, l’angle zénithal est également l’angle d’incidence sur le plan horizontal. Les azimuts sont normalement mesurés dans le sens des aiguilles d’une montre à partir du nord, bien que d’autres conventions existent. Des relations trigonométriques existent entre la latitude  $\phi$ , la déclinaison solaire  $\delta$  et l’angle horaire  $\omega$ . Ces points sont abordés en Annexe 2 et le détail des calculs peut être trouvé dans (Iqbal, 2012). Étant donné que le calcul de la position du soleil doit pouvoir être fait à tout moment et pour n’importe quel endroit par rapport un observateur, une méthode générale et précise est nécessaire. Différents algorithmes de prédiction de la position du soleil existent dans la littérature. Nous présentons dans le Tableau I.1 un résumé des algorithmes couramment utilisés pour prédire la position du soleil avec leurs caractéristiques.

**Tableau I.1:** Spécificités des algorithmes SPA, SG, MICH, ENEA et SG2 (Chauvin, 2016)

Caractéristiques	SPA	SG	MICH	ENEA	SG2
Validité [années]	[-2000 ;6000]	[1980 ;2030]	[1950 ;2050]	[2003 ;2023]	[1980 ;2030]
Incertitude [°]	0,0003	0,31	0,0128	0,0029	0,0025
Additions	1000	25	20	40	20
Multiplications	1300	35	35	40	30
Fonctions trigo.	300	25	25	25	23
Temps de calcul	tSPA	tSPA/20	tSPA/20	tSPA/20	tSPA/20
Année	2003	2000	1985	2007	2012

Par comparaison, ce tableau met en évidence la précision et le temps de calcul des différents algorithmes en prenant comme référence SPA (Solar position algorithm ) qui est l’algorithme le plus précis développé par le NREL (National Renewable Energy Laboratory) (Reda and Andreas, 2004). Le plus ancien est le MICH développé en 1988 par Michalsky (Michalsky, 1988). Le SPA est capable d’estimer la position du soleil avec une précision de  $0,0003^\circ$  et dans un intervalle d’années très large ([-2000 ;6000]). L’algorithme est basé sur les travaux de Bretagnon et Francou, 1988 et les équations proposées par Meeus (1999).

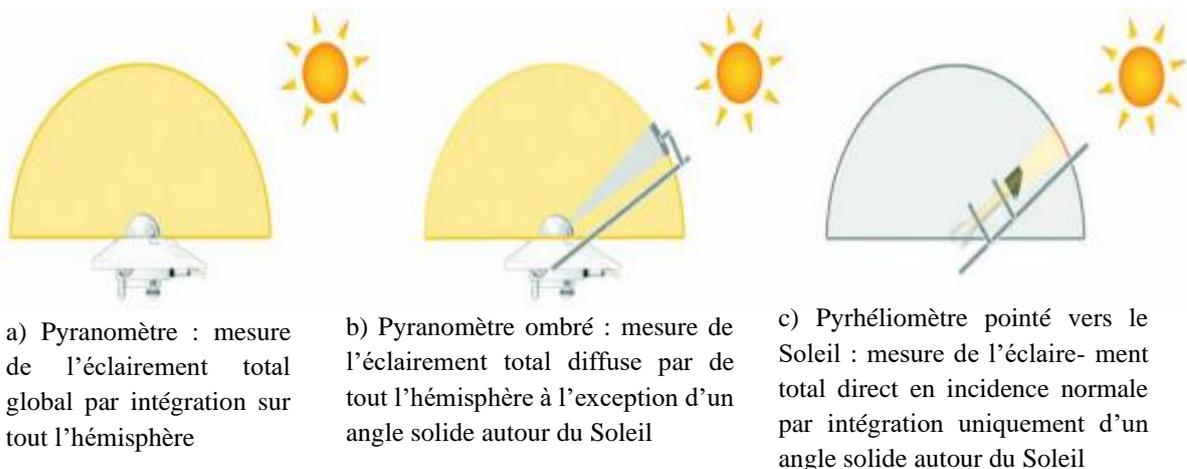


Il est ainsi utilisé comme référence par la plupart des autres algorithmes estimant la position du soleil. Néanmoins, son temps de calcul pose problème du fait que le nombre de calculs qu'il doit effectuer est très élevé. En effet, pour des algorithmes satellitaires comme Helioclim3 qui nécessitent environ 1 million de positions solaires calculées, avec une vitesse de calcul suffisamment rapide (en moins d'une minute) pour qu'elles puissent être utilisées pour traiter rapidement une image satellitaire de 9 millions de pixels. Le SPA n'est pas adapté pour atteindre cet objectif (Blanc et Wald, 2012). À l'inverse, d'autres algorithmes plus rapides en temps de calcul ont vu le jour, mais sont moins précis. Parmi ceux-ci, on a le ENEA développé par (Grena, 2008) avec une précision de  $0,0029^\circ$ , mais pour un intervalle d'années assez court ([2003 ;2023]). Le SG2 est jusqu'à maintenant le plus récent et le plus rapide de tous. Il a été développé par Blanc et Wald et est une version améliorée du SG (Blanc and Wald, 2012; Rigollier et al., 2000).

## I.2 Mesure et méthode d'estimation de la ressource solaire

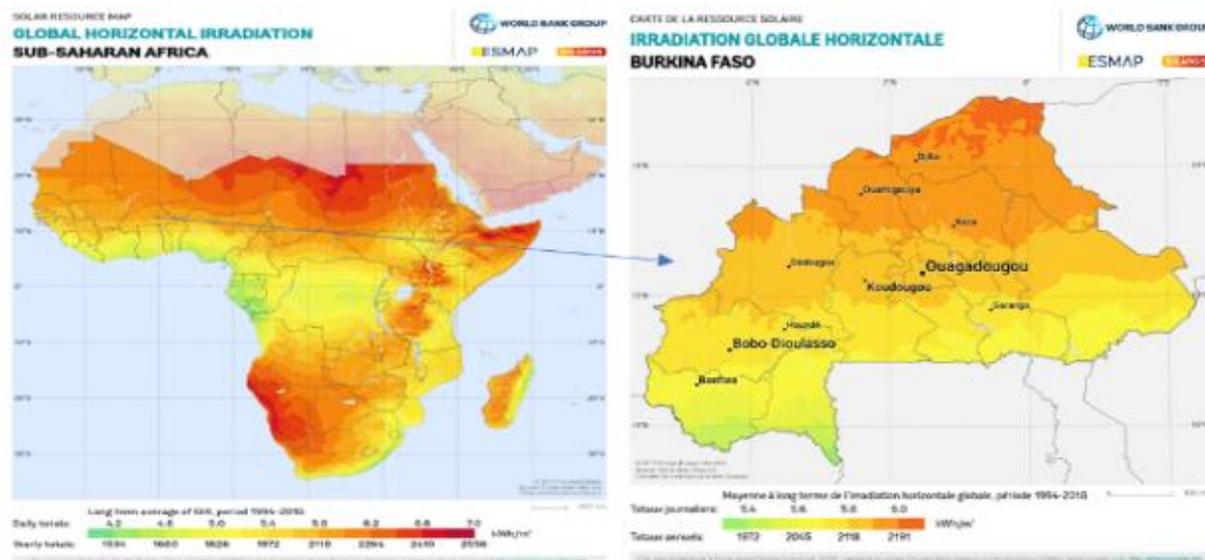
### I.2.1 Techniques de mesure de l'irradiance solaire

L'irradiance globale, directe et diffuse sur les surfaces inclinées est généralement mesurée par des pyranomètres et pyrhéliomètres des stations météorologiques au sol (Figure I.3), avec une erreur inférieure à 5 %. Pour un étalonnage plus précis, des précisions de mesure allant jusqu'à  $\pm 1\%$  peuvent être obtenues. Elles constituent le meilleur moyen pour obtenir des mesures précises de l'éclairement du soleil. Cependant, il est presque utopique d'envisager de couvrir toute la surface du globe avec des stations météorologiques au sol. Ainsi, de nombreuses méthodes de mesure font appel aux images acquises par les satellites météorologiques pour obtenir une estimation de l'éclairement soleil en tout point et à tout instant.



**Figure I.3** Appareil classique de mesure du rayonnement solaire sur terre (Blanc et Wald, 2015)

Les résultats des mesures satellitaires et les modèles de propagation du rayonnement solaire dans l’atmosphère sont utilisés pour créer des bases de données actualisées, permettant l’interpolation des données sur l’intensité du rayonnement solaire sur de grandes surfaces. Les inconvénients de la plupart des bases de données étrangères sont le coût d’accès, la couverture limitée du territoire et, par conséquent, le manque de données pour la plupart des régions (Brent et al., 2020). Par ailleurs, les stations au sol sont utilisées pour valider les méthodes satellitaires qui ont atteint un haut degré de maturité avec une couverture mondiale. À titre d’exemple, nous pouvons citer Solargis, Helioclim 3 et Solemi (MALAWI, 2018). De plus, les méthodes satellitaires sont très importantes dans les projets d’installation des centrales solaires, souvent pour aider les ingénieurs à mieux exploiter les territoires les plus ensoleillés. À titre illustratif nous proposons sur la Figure I.4 une cartographie du potentiel solaire des pays de l’Afrique subsaharienne et du Burkina Faso.



**Figure I.4** Carte de la ressource solaire en Afrique subsaharienne et le Burkina Faso (“Free Maps and GIS data / Overview | Solargis,” 2019.)

## I.2.2 Techniques de modélisation du rayonnement solaire

### I.2.2.1 Modèles existants

La modélisation du rayonnement solaire et ses différentes composantes ont fait l’objet de plusieurs travaux de recherches. Étant donné qu’il n’est pas possible d’obtenir des mesures du RS pour chaque endroit sur la terre, des études sont menées pour modéliser ces informations. Elles couvrent un large domaine d’applications telles que la conception des systèmes de production d’énergie solaire (photovoltaïque ou thermique), le séchage et ventilation solaire, bâtiment, etc. Ces modèles ont des portées différentes et donc nous nous intéressons à ceux qui



peuvent être utilisés dans le secteur du bâtiment. Dans la littérature, il existe une variété de modèles. Parmi ceux-ci, nous pouvons citer les modèles physiques et les modèles mathématiques communément appelés modèles de décomposition ou statistique.

### I.2.2.1.1 Modèles physiques

Les modèles physiques utilisent des connaissances assez approfondies sur les phénomènes atmosphériques et extra-terrestres pour prédire le RS. Ils ont la capacité de prédire le RS dans différentes gammes du spectre soleil, pour des applications d'ingénierie ou de construction. Nous pouvons citer les types suivants : 1) modèles empiriques, 2) modèles basés sur des codes rigoureux et sophistiqués, 3) modèles semi-empiriques.

✚ Les modèles empiriques font référence à la méthode de modélisation classique basée sur une compréhension empirique de l'irradiance spectrale du soleil, en conjonction avec des données météorologiques et d'irradiance solaire mesurée historiquement. Nous pouvons citer par exemple le modèle SOLAR2000 (Tobiska, 2000) et le modèle de Leckner (Leckner, 1978). Toutefois, pour les modèles empiriques, la partie du spectre validée est principalement limitée à 1 et 100  $\mu\text{m}$ , en raison de la portée limitée des appareils de mesure et d'essai (Duan et al., 2020).

✚ Les codes rigoureux et sophistiqués tels que les modèles LOWTRAN7 (Bird and Riordan, 1986) et SEA (Lean, 2001). Pour prédire le RS, ces types de modèles examinent en profondeur les caractéristiques physiques de l'atmosphère en utilisant des appareils de mesure sophistiqués. Ils utilisent comme données d'entrée, des mesures assez précises des constituants des gaz atmosphériques et des aérosols. À l'inverse des modèles du type 1, les types 2 semblent présenter une plus grande précision, mais l'utilisation de cette méthode nécessite des inputs très restrictifs en termes de profils d'ozone, de vapeur d'eau, de profil de densité de l'air, etc.

✚ Les modèles semi-empiriques combinent les types 1 et 2. Par ailleurs, ils impliquent des processus de modélisation à la fois physiques et statistiques et simplifient les profils verticaux de l'atmosphère. Parmi ces modèles les plus utilisés sont les CSI (Clear Sky Irradiance). Les CSI prédisent le RS avec l'hypothèse qu'il n'y a pas de nuage dans le ciel. Ils sont beaucoup plus utilisés dans le monde pour diverses applications et même par les algorithmes satellitaires. En effet le modèle de C. Perrin de Brichambaut, dit « Capderou » a été proposé en 1988 pour le calcul du RS global, direct et diffus en Algérie (Capderou, 1987). Tout récemment en 2020, Babikir et al, en raison du manque d'instruments pour mesurer le rayonnement solaire dans les stations météorologiques sur tout le territoire tchadien, utilisa le



même modèle Capderou pour modéliser les composantes directes et diffuses (Babikir et al., 2020). Par ailleurs, le modèle Capderou a fait l'objet de plusieurs critiques en raison de l'erreur considérable engendrée dans l'estimation des composantes diffuses et globales du RS due essentiellement aux facteurs de trouble atmosphérique. À cet effet, Yettou et al proposèrent un nouveau modèle nommé R.Sun basé sur le facteur de trouble atmosphérique de Linke dont l'erreur engendrée en terme d'écart est de 3,1 % en moyenne et négligeables face au modèle de Capderou (Yettou et al., 2009). Dans un même ordre d'idées Mesri-Merad et al simulèrent les modèles de Lacis & Hansen, Bird & Hulstrom, le modèle de Atwater & Ball, et celui de Davies & Hay pour les sites de Ghardaïa et Bouzaréah en Algérie (Mesri-Merad et al., 2012). Les résultats obtenus par simulation des quatre modèles ont montré que les modèles de Davies & Hay, et celui de Bird & Hulstrom donnent une meilleure estimation des composantes du RS avec des erreurs d'écart négligeables (8 % et 9 % en moyenne respectivement) entre les valeurs mesurées et calculées. Parallèlement à l'étude précédente, Guengane et al évaluèrent le potentiel solaire du Burkina Faso par une simulation numérique basée sur les quatre mêmes modèles théoriques CSI utilisés par Mesri-Merad et al (GUENGANE et al., 2019). Les résultats montrent que le modèle de Bird & Hulstrom et celui de Ball & Atwater permettent d'évaluer mieux le potentiel solaire avec des erreurs moyennes de 5 % pour la composante globale. Gueymard et Thevenard en 2009 modifièrent les modèles CSI d'ASHRAE (1967) pour des fins d'études sur l'énergie des bâtiments (Gueymard et Thevenard, 2009). En 2013, suite au problème de sous-estimation du DNI et du GHI par l'algorithme satellitaire SASRAB (Satellite Algorithm for the Shortwave Radiation Budget), le NREL, proposa le modèle de Bird & Hulstrom qui peut mesurer le RS dans la bande 0,3 à 4  $\mu\text{m}$  pour le remplacer (Sengupta and Gotseff, 2013). Cependant, il s'avère que les modèles CSI sont aussi limités. En effet Alsadi et Nassar (2016) proposèrent dans leur étude de nouveaux paramètres d'entrée du modèle ASHRAE pour estimer le RS par ciel clair afin de l'adapter à leur contexte pour des applications de climatisation active. Ce modèle a été développé pour les conditions atmosphériques aux États-Unis, qui étaient assez différentes des conditions météorologiques des territoires arabes (Alsadi et Nassar, 2016). Ruiz-Arias et Gueymard (2018) étudièrent, en revue, 36 études de validation des modèles CSI de la littérature. Dans un comparatif des modèles CSI, ils mettaient en évidence la précision et la difficulté des CSI. Ils montrèrent ainsi que, pour des zones ayant une teneur en aérosols élevée ou située dans des altitudes plus basses, cette hypothèse simplificatrice peut aboutir à des erreurs significatives. Ruiz-Arias et Gueymard recommandèrent différents modèles CSI en fonction des zones climatiques (Ruiz-Arias et Gueymard, 2018). À la lumière de l'étude précédente, Sun et al comparent 75 modèles



CSI y compris ceux cités précédemment en fonction du climat mondial. Par conséquent, ils classifièrent et démontrèrent que parmi tous ces modèles, le modèle MCA2 développé par Davies et McKay (1982) au Canada et le modèle RETS2v5 développé par Gueymard (2008), prédisent mieux le RS dans le monde. Par contre, à l'équateur, la version améliorée du modèle de Gueymard, le modèle RETS2v9, prédit mieux le RS (Sun et al., 2019). Pour finir, il n'est pas faux de dire qu'aucune formule semi-empirique universelle ne peut être utilisés pour l'évaluation du RS dans tous les pays du monde.

### 1.2.2.1.2 Modèles mathématiques ou de décomposition

Les modèles de décomposition n'utilisent généralement que des données du RS global horizontal pour estimer le RS diffus horizontal ou l'inverse. En effet le calcul du rayonnement solaire global sur un plan incliné nécessite la connaissance du rayonnement diffus sur le même plan. Ainsi dans la majorité des cas, on ne dispose que du RS global horizontal. C'est de là que ces équations prennent de l'importance et diverses corrélations ont été développées dans le but d'extraire le RS diffus horizontal à partir du global. Les modèles de décomposition sont basés sur une corrélation entre le RS diffus et le RS global sur une surface horizontale. Cette corrélation est définie en fonction de l'indice de clarté horaire  $k_t$  (rapport entre le RS horizontal global GHI et le RS extraterrestre  $G_{sc}$  donné par l'équation (1)). L'indice de clarté ( $k_t$ ) est une mesure des effets atmosphériques dans un endroit isolé. C'est un paramètre aléatoire qui varie en fonction de la période de l'année, de la saison, des conditions climatiques et de la situation géographique d'un lieu (Iqbal, 2012). Là encore, les distributions de  $k_t$  ne sont pas universelles. Elles sont régionales et empiriquement dérivées, car les distributions de  $K_t$  reflètent les conditions météorologiques régionales pour une masse d'air dominante donnée (Figure I.5). On peut généraliser cette méthode par les équations 1, 2 et 3. L'équation (1) est fondamentale puisqu'elle dissocie l'atténuation du rayonnement solaire direct produite par l'atmosphère de l'atténuation produite par les nuages. C'est le point de départ de ces modèles.

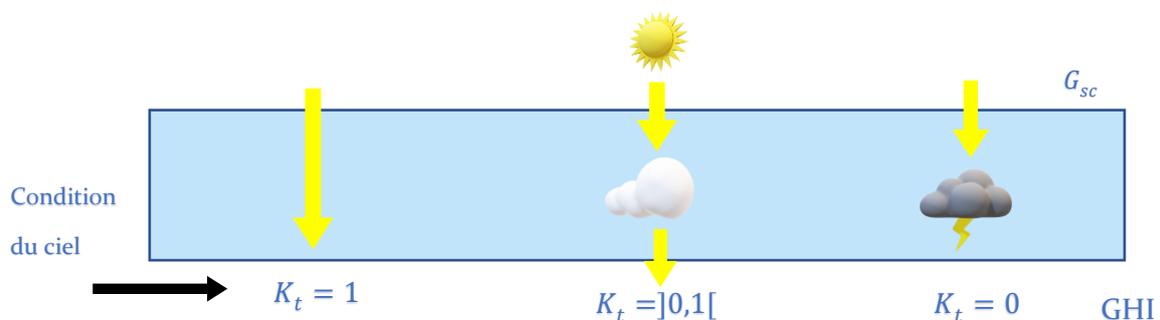


Figure I.5 Indice de clarté  $k_t$  en fonction des conditions atmosphériques

$$K_t = \frac{GHI}{G_{sc}} \quad (1)$$

et

$$K_d = f(K_t) \quad (2)$$



Ainsi on peut écrire :  $DHI = K_d \times GHI$  (3)

Où  $K_d$  représente une fonction polynomiale de degrés  $n$ . La précision de ces modèles dépend aussi de  $n$ .

La corrélation quotidienne entre  $K_d$  et  $kt$  a été initialement proposée par Liu and Jordan (1960). Par la suite Ideriah (1981) a utilisé des données mesurées du Nigeria pour établir les modèles de prédiction (Ideriah, 1981). Des corrélations entre les  $K_d$  et  $kt$  horaires ont été établies par un certain nombre de chercheurs. Au Burkina Faso, des études préliminaires ont été menées par Garané (1992) et Baldy (1976), qui ont établi une corrélation entre le rayonnement solaire et la durée d'ensoleillement sur des périodes allant de 1971 à 1990 (Garané) et de 1971 à 1975 (Baldy) pour cinq villes du pays. Pour donner suite à cela, Coulibaly et Ouédraogo (2016) proposèrent une seule corrélation valable pour toutes les régions du Burkina Faso, prenant en compte la longitude, la latitude du lieu, et la durée d'ensoleillement menant à des résultats avec un coefficient de corrélation de 0,93. Il faut noter aussi que les modèles développés par les auteurs cités précédemment ont la capacité de calculer uniquement le GHI (Coulibaly et Ouédraogo, 2016). Alternativement, les méthodes d'intelligence artificielle, en particulier les réseaux de neurones artificiels (ANN), ont attiré une attention dans la littérature sur l'estimation du GHI ou DHI sur des surfaces horizontales et inclinées à partir de l'une ou l'autre, étant donné leur efficacité dans la gestion des relations non linéaires et complexes (Ibeh et al., 2012) (Pazikadin et al., 2020). L'inconvénient de tous ces modèles est dans un premier temps la nécessité d'avoir des données du rayonnement solaire issues d'une station météo pour le calcul du  $kt$ . Cependant, l'accès à ces données n'est toujours pas aisé. Dans un second temps, ces modèles ne fonctionnent que pour des localités voisines pour qui ces données ont été modélisées par les méthodes de régression.

### 1.2.2.2 Estimation du rayonnement direct et diffus sur un plan incliné

Pour la conception des bâtiments durables et écologiques, il est plus important de connaître avec précision la quantité de rayonnement solaire et le niveau de lumière du jour sur des plans verticaux et inclinés, en particulier pour les immeubles de grande hauteur. Alors que l'intensité de l'irradiance directe ne dépend que de l'angle d'incidence sur la surface du receveur, différentes procédures de conversion existent pour l'irradiance diffuse. Ainsi, diverses corrélations ont ainsi été développées dans ce but. On distingue donc les modèles de première génération, isotropiques, qui supposent que le rayonnement se diffuse de manière uniforme dans le ciel. Plus tard, Moon (1942) a démontré le caractère anisotropique du rayonnement, basé sur des observations, et ainsi, des modèles de seconde génération ont vu le jour. Le rayonnement diffus est divisé principalement en trois composantes, le diffus de



l'horizon, le diffus du ciel et le diffus de la couronne solaire. En juillet 1986, le NERL effectua une étude comparative de cinq modèles<sup>1</sup> qui a donné des résultats qui ont montré que le modèle de Perez permet d'obtenir les résultats les plus fiables avec une surestimation du rayonnement diffus : 6,7 % parois Sud, 10,6 % parois ouest et 18,0 % pour la paroi nord. Plus tard, d'autres études ont été réalisées dans les mêmes ordres d'idées concluant les meilleurs résultats en faveur du modèle de Perez et celui de Hay (1979). Cependant, si le modèle anisotrope de référence de Perez est particulièrement adapté pour une échelle de temps très précise [minute ou heure], les auteurs ont vérifié que le modèle de Hay (1979) est plus adapté à l'utilisation de valeurs horaires moyennes par mois (Carneiro, 2011). En outre, les besoins d'informations sur l'éclairement lumineux du jour a conduit un certain nombre de chercheurs ont envisagé des méthodes permettant de le déterminer. La lumière du jour étant la partie visible de l'énergie solaire, la méthode la plus populaire pour estimer la lumière du jour consiste à dériver l'éclairement lumineux à partir de données d'irradiation solaire plus largement mesurées en utilisant l'efficacité lumineuse définie comme étant le rapport entre l'éclairement lumineux du jour et l'irradiation solaire correspondante. Perez et al (1993) ont proposé le modèle pour tous temps en fonction de la clarté et de la luminosité du ciel, selon lequel tous les ciels étaient classés en huit catégories. Kittler et al (1997) classèrent toutes les conditions du ciel en 15 catégories, et ont proposé les équations numériques pour montrer la distribution catégorisée de la luminance du ciel pour chaque cas. Par la suite, la CIE (2003) a recommandé ce modèle comme modèle au ciel général standard (CIE, 2003).

### **I.2.2.3 Outil de calcul thermique et Simulation thermique dynamique dans le bâtiment**

La protection solaire peut influencer de manière significative l'ampleur des températures de surfaces locales qui, à leur tour, influencent l'échange radiatif externe à ondes longues et le transfert de chaleur moyen quotidien qui s'en suit à travers les façades des bâtiments. Par ailleurs, les zones ombragées autour des structures bâties constituent une stratégie efficace pour réduire la lumière directe du soleil à l'intérieur des bâtiments situés dans les pays à climat chaud. Dans les régions à climat chaud et humide, l'ombre a pour effet de réduire la température de l'air ambiant et de favoriser le refroidissement naturel. Les outils de simulation informatique de l'ensoleillement global autour d'une forme bâtie rejoignent mieux les approches architecturales et urbaines. Ils livrent des résultats physiques synthétiques, que l'on ne pourrait obtenir par calcul manuel dès la conception. Par ailleurs, la géométrie des ombres et l'échange de rayonnement à ondes longues sont difficiles à modéliser en raison des caractéristiques topographiques des

---

<sup>1</sup> (Liu and Jordan, 1960) (Temps and Coulson, 1977) (Klucher, 1979) [Hay, 1979] et (Perez et al., 1987)



bâtiments locaux, du sol et de l'espace dans un environnement urbain. Mais, de nos jours avec les progrès de la technologie, on arrive à les évaluer avec précision. Les outils les plus utilisés sont les STD (Simulation Thermique Dynamique) de bâtiments. Ils ont des moteurs de calculs complexes qui tiennent compte des échanges thermiques entre le bâtiment et son environnement (climat). Ils prennent en compte de très nombreux paramètres qui concernent généralement : la géométrie du projet et les caractéristiques des éléments de construction (matériaux ou systèmes) (Sanchez et al., 2014). Les outils les plus répandus pour ce faire sont : Energy Plus, TRNSYS (Transient System Simulation Tool), Dymola, DOE et pour les architectes, ArchiWizard, Ecotect ou le Design Builder. Cependant Spitz fait ressortir dans son étude les incertitudes liées aux résultats des simulations de la plupart des outils cités précédemment (Spitz, 2012). Il énuméra quelques facteurs importants liés à l'incertitude des résultats. Il s'agit par exemple :

- ✚ L'utilisation du pas de temps horaire (données mensuelles) pour le rayonnement solaire ne permet pas de représenter correctement le lever et le coucher du soleil et lisse les perturbations en cours de journée induisant des biais dans les résultats de simulation dans le cas de bâtiments à faible consommation d'énergie.

- ✚ Localisation de la station météo : elle est importante et elle doit être suffisamment proche du bâtiment simulé pour ne pas engendrer d'incertitude. En effet, Il montre par simulation l'influence des résultats de simulation avec des données météo du site voisin.

De plus, ces incertitudes sont beaucoup plus remarquées lors des simulations à l'échelle urbaine. Les études Frayssinet et al ont prouvé par des analyses de sensibilité qu'on peut atteindre jusqu'à 25 % d'incertitude dans le cadre urbain (Frayssinet et al., 2018). En plus, ces outils demandent un plus grand investissement de la part du modélisateur. La prise en main est parfois laborieuse et de nombreuses données d'entrée sont nécessaires pour profiter pleinement des capacités.

### **Conclusion partielle**

En résumé, un large éventail d'études a été mené pour prédire l'irradiation solaire globale, directe et diffuse sur des plans horizontaux et inclinés. Mais la majorité de ces méthodes ont des portées différentes conduisant ainsi à la certitude qu'aucun modèle universel n'existe jusqu'à nos jours. Ceci est dû en majeure partie à la non-maitrise de la variation des composants atmosphériques propres à chaque lieu. Toutefois, on a pu constater que des modèles peuvent être adaptés ou utilisés pour certaines régions. D'autre part, on a pu constater que les outils de simulation des bâtiments présentent des incertitudes qui sont en partie liées aux données d'entrée et selon l'échelle de simulation considérée. Nous émettons à présent l'hypothèse qu'une combinaison des modèles les plus aboutis pour le calcul de la position du soleil et du RS peut-être un atout pour répondre à notre problématique.

## CHAPITRE II : MATÉRIELS ET MÉTHODES

### I.1 Matériels

#### I.1.1 Plateforme expérimentale des bâtiments pilotes de 2iE

La plateforme expérimentale des bâtiments se trouve au sein du site de Kamboinsin de l'institut 2iE situé à une latitude de  $12.5^\circ$  Nord et une longitude de  $1.5^\circ$  Ouest. Elle est composée de trois bâtiments appelés « bâtiments pilotes » qui sont construits avec des matériaux différents qui sont le parpaing classique, le BTC géopolymère et le BTC stabilisé au ciment. Ils servent à conduire des expériences de confort thermique en zone subsaharienne. Dans le cadre du présent mémoire, les flux solaires ont été modélisés sur différentes parois du bâtiment pilote 1 sans tenir compte des effets d'ombres (Figure II.1 b).

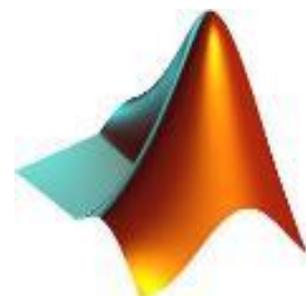


Figure II.1 : a) Bâtiments Pilotes, b) Position actuelle des 3 bâtiments pilotes

#### I.1.2 Outils de programmation et simulation

Dans le cadre des présents travaux, deux outils de programmation et simulation ont été utilisés :

- MATLAB (« matrix laboratory ») est un environnement de programmation ; il est utilisé à des fins de calcul numérique. Développée par la société The MathWorks, elle permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes, de créer des interfaces utilisateurs, et peut s'interfacer avec d'autres langages comme le C, C++, Java. Nous l'utilisons ici pour la simulation numérique du rayonnement solaire sur les parois des bâtiments pilotes et pour la création d'une interface graphique afin de rendre facile l'usage des modèles de calcul utilisés.





- Gritec Archiwizard est un logiciel de simulation thermique 3D des bâtiments. Il permet d'évaluer les performances énergétiques interactives d'un projet pour une sélection économique et écologique directement à partir de modèles BIM numériques. Il a la capacité de fournir rapidement des résultats, par exemple sur l'impact d'une modification géométrique. Nous l'utilisons ici pour effectuer une simulation 3D des ombres des bâtiments afin d'étudier le comportement des murs par rapport au rayonnement solaire.



### I.1.3 Sites et base de données des mesures expérimentales du rayonnement solaire

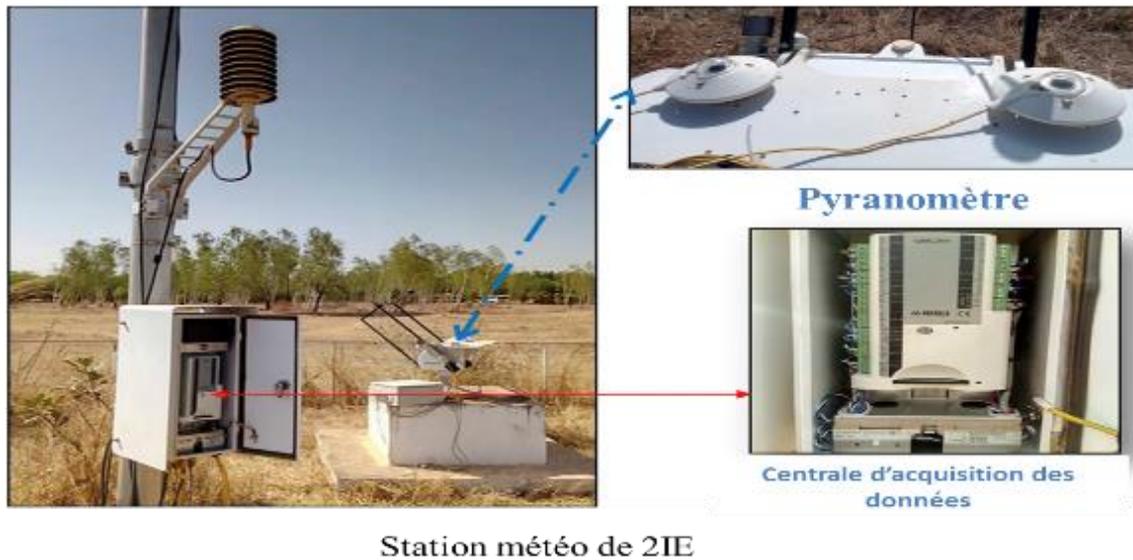


Figure II.2: Station Météo de 2iE

Les données expérimentales, qui ont servi dans notre étude, sont des mesures d'irradiation globale à l'échelle horaire fournis par la station météo de 2iE et présenter sur la **Figure II .1**. Les informations géographiques ainsi que la période d'enregistrement sont présentées dans le tableau II.1. Les mesures du rayonnement solaire global ont été prises à l'aide de pyranomètre de marque Kipp & Zone de la série CMP11. Les caractéristiques techniques sont présentées en Annexe 2.

Tableau II.1 Caractéristiques géographiques du site et Période d'enregistrement des données

Station Météo 2iE	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Période des données (mois/jour/année)	Angle de mesure (°)	Climat	Albédo
Kamboinsin	12.46	1.56	301	04/08/2019 au 04/08/2020	0	Semi-désertique	0,2

## **I.2 Méthodologie**

La revue bibliographique précédente nous a permis de nous rendre compte que la modélisation du rayonnement solaire ne peut pas être un sujet d'universalité. Cela dit, nous allons donc vérifier notre hypothèse de départ qui consiste à combiner les modèles les plus aboutis et précis dans l'espoir de répondre à notre problématique. Ainsi, cette partie est structurée en trois sections. Dans la première section, nous décrirons de façon concise les modèles pour le calcul du vecteur solaire, du rayonnement solaire sur les plans inclinés des bâtiments. Dans la deuxième section, nous présenterons les formules utilisées pour l'évaluation de la performance du modèle de calcul du rayonnement solaire et l'algorithme proposé pour notre programme de simulation du rayonnement solaire. La troisième section présente la technique utilisée pour simuler l'ombre des trois bâtiments pilotes.

### **I.2.1 Modélisation du rayonnement solaire et création d'interface graphique**

#### **I.2.1.1 Modèle de prédiction de la position du soleil**

Pour prédire la position du soleil à tout instant de l'année pour le calcul du rayonnement solaire, nous nous sommes basés sur l'algorithme SPA (voir tableau I.1). Toutefois, la SPA nous fournit comme résultats pour le calcul du rayonnement solaire :

1. La déclinaison solaire donnés par l'équation (48) Annexe 3.
2. L'angle horaire donnés par l'équation (49) Annexe 3.
3. L'angle zénithal donnés par l'équation (53) Annexe 3.
4. L'angle d'incidence d'une surface orientée dans n'importe quelle direction et donnée par l'équation (56) Annexe 3.
5. L'azimut du soleil (55) Annexe 3.

#### **I.2.1.2 Modèle de calcul du rayonnement solaire sur un plan horizontal**

Pour calculer le GHI, DHI et DNI sur un plan horizontal, nous avons utilisé deux types de modèles lors de la conception de l'outil du calcul du rayonnement solaire. Un modèle CSI pour des utilisateurs qui ne dispose pas de données et un modèle de décomposition du rayonnement solaire en fonction de la zone d'étude pour des utilisateurs qui disposent des données mesurées du rayonnement solaire global.

✚ Premier cas : modèle CSI pour des utilisateurs qui ne disposent pas de donnée

À la lumière des travaux de (Sun et al., 2019), le modèle CSI de (Gueymard, 2008) semble plus adapté pour la prédiction du rayonnement solaire dans notre contexte d'étude. Par ailleurs, ils n'ont pas été testés sur des stations météo disponibles dans nos zones d'étude. À cet effet il serait important d'étudier les résultats de prédiction des modèles jugés adaptés à notre contexte



d'étude. Pour ce fait, nous avons choisi trois modèles pour une étude comparative qui sont : Bird, MCA2 et RETS2v5. Nous présentons dans le tableau II.2, les données requises pour le calcul du rayonnement solaire direct diffus et global sur un plan horizontal pour les trois modèles.

**Tableau II.2** Variable d'entre des modèles CSI pour le calcul des DHI, DNI et GHI.

Modèle										Output
	$E_{sc}$	P	$\varpi$	$m_{O3}$	$m_{NO2}$	$m_{HO2}$	$\theta_z$	$\alpha$	$\beta$	GHI
RETS2v5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	DNI
MCA2	✓	✓	✓			✓	✓	✓		
BIRD	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	DHI

- ( $E_{sc}$ ) : constante solaire est 1366,1 W/m<sup>2</sup>, 1353 W/m<sup>2</sup> et 1367 W/m<sup>2</sup> respectivement pour le modèle RETS2v5, MCA2 et BIRD.
- $\theta_z$  (rad): Angle zénithal (rad) est calculer par SPA
- P [mb] : Pression barométrique locale moyenne : 979 mb pour Ouagadougou
- $m_{O3}$ : Quantité totale d'ozone O3 [atm-cm] : calculés par l'équation (15) ou disponible sur le site de la NASA (voir Annexe 1)
- $m_{NO2}$ : Quantité totale de dioxyde d'azote uNO2 [atm-cm] : 0,0002 valeur recommandée par les auteurs en absence de donnés ou disponible sur le site de la NASA (voir Annexe 1)
- $m_{HO2}$  Vapeur d'eau précipitable totale H2O [cm], peut être calculés par l'équation (12) ou disponible sur le site de la NASA (voir Annexe 1).
- Les coefficients d'Angström exposant  $\alpha$  et Angström coefficient de turbidité  $\beta$  sont présenter dans le tableau 1 en Annexe 1.
- $\varpi$ : L'Albédo du sol 0,2 pour Ouagadougou

**Deuxième cas : Modèle de décomposition pour des utilisateurs disposant du rayonnement solaire global**

Pour des utilisateurs qui disposent des données du rayonnement global nous proposons le modèle de reindl2 développé par Reindl et al., (1990) pour l'extraction du DNI à des fins de calcul sur différentes façades d'un bâtiment. Ce modèle de corrélation prend en compte comme variable d'entrée l'angle zénithal du soleil l'indice de clarté. Ces équations sont présentées comme suit :

$$\text{Pour } 0 < K_t < 0,3 \quad \frac{DHI}{GHI} = 1,02 - 0,25 \times K_t + 0,0123 \times \sin(\theta_z) \quad (4-a)$$

$$\text{Pour } 0,3 < K_t < 0,78 \quad \frac{DHI}{GHI} = 1,400 - 1,749 \times K_t + 0,0177 \times \sin(\theta_z) \quad (4-b)$$

$$\text{Pour } 0,78 < K_t \quad \frac{DHI}{GHI} = 0,486 \times K_t + 0,182 \times \sin(\theta_z) \quad (4-c)$$

Avec  $\theta_z$  l'angle zénithal du lieu et  $K_t$  l'indice de clarté.

### 1.2.1.3 Calcul du rayonnement diffus sur un plan incliné

L'expression mathématique du modèle Perez et al (1990) permettant de calculer l'irradiance solaire diffuse sur un plan incliné est :

$$I_{dT} = I_{dh} \times \left[ (1 - F_1) \times \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + F_1 \times \frac{a}{b} + F_2 \times \sin \beta \right] \quad (5)$$

Où les paramètres a et b prennent en compte l'angle d'incidence de la composante circumsolaire de ce modèle. Ces paramètres sont définis comme :

$$a = \max(0, \cos \theta) \quad (6)$$

$$b = \max(0,0872, \cos \theta_z) \quad (7)$$

Le coefficient de brillance du pourtour du soleil ou circumsolar est défini comme :

$$F_1 = \max(0, f_{11} + f_{12} \times \Delta + f_{13}) \quad (8)$$

et le coefficient de brillance de l'horizon est défini comme :

$$F_2 = f_{12} + f_{22} \times \Delta + f_{23} \quad (9)$$

Les coefficients  $F_1$  et  $F_2$  dépendent de la clarté du ciel,  $\varepsilon$  :

$$\varepsilon = \frac{\frac{I_{dh} + I_{bn}}{I_{dh}} + 5,535 \times 10^{-6} \times \cos \theta_z^3}{1 + 5,535 \times 10^{-6} \times \cos \theta_z^3} \quad (10)$$

Le paramètre  $\varepsilon$  donne une caractérisation de l'épaisseur des nuages qui est classée en huit catégories, c'est-à-dire deux conditions extrêmes de la couverture nuageuse (ciel sans nuages et ciel complètement couvert) et six conditions intermédiaires (Annexe 1).

Le paramètre  $\Delta$  correspond à la luminosité du ciel définie selon l'équation (11).

Le rayonnement  $G_{sc}$  correspond au rayonnement hors atmosphère.

$$\Delta = m \times \frac{I_{dh}}{I_{on}} \quad (11)$$



### I.2.1.4 Indicateurs de performance

Dans le but d'une meilleure validation, une évaluation statistique des résultats a été réalisée sur les mesures de l'éclairement solaires de quelques journées claires sélectionnées comparées aux valeurs prédites par les modèles proposés. Plusieurs critères ont été utilisés pour évaluer l'exactitude de ces modèles. Les paramètres d'évaluation sont calculés comme indiqué dans le Tableau II.3, où  $k$  représente le nombre total d'observations pour la période en question,  $I_{g_i \text{ mesurée}}$  est la  $i$ ème valeur mesurée,  $I_{g_i \text{ estimée}}$  est la  $i$ ème valeur estimée.

**Tableau II.3** : Indicateurs de performance

Indicateurs de performance	
Mesure	Expressions mathématiques
Erreur quadratique moyenne (RMSE) (W/m <sup>2</sup> )	$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^k \frac{(I_{g_i \text{ estimée}} - I_{g_i \text{ mesurée}})^2}{k}} \quad (12)$
Erreur de biais moyenne (MBE) (W/m <sup>2</sup> )	$MBE = \sum_{i=1}^k \frac{(I_{g_i \text{ estimée}} - I_{g_i \text{ mesurée}})}{k} \quad (13)$
Coefficient de détermination (R <sup>2</sup> )	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k (I_{g_i \text{ estimée}} - I_{g_i \text{ mesurée}})^2}{\sum_{i=1}^k (I_{g_i \text{ estimée}} - I_{g_i \text{ mesurée moyenne}})^2} \quad (14)$

Le RMSE est une mesure fréquemment utilisée pour évaluer les différences entre les valeurs prédites par un modèle et les valeurs observées. Il fournit des informations sur les performances à court terme qui sont des mesures de la variation des valeurs prédites autour des données mesurées. Plus la RMSE est faible, plus l'estimation est précise en terme d'exactitude et le RMSE uniquement pour comparer les erreurs de prédiction de différents modèles pour un ensemble de données ou une variable particulière. Le MBE est une indication de l'écart moyen entre les valeurs prédites par rapport aux données mesurées correspondantes. Il peut fournir des informations sur les performances à long terme des modèles ; plus le MBE tend vers la valeur 0, meilleures sont les prévisions du modèle à long terme. Les valeurs négatives et positives du MBE représentent respectivement une sous-estimation et une surestimation de la part du modèle. En fin, le R<sup>2</sup> est un indicateur qui permet de juger de la qualité d'une régression. Il évalue la performance ou l'adéquation entre le modèle par rapport au niveau de variation présente dans les données observées. Lorsque le R<sup>2</sup> est de 1, cela veut dire que le modèle est capable de déterminer 100 % de la distribution des données observées ou le modèle prédire mieux. Par contre, si le R<sup>2</sup> est nul, cela signifie que le modèle utilisé n'explique absolument pas la distribution des points ou des données observées.



### I.2.1.5 Algorithme de calcul de la position du soleil et du rayonnement solaire

Dans ce travail, le logiciel MATLAB est utilisé afin d'estimer le rayonnement solaire horaire sur la surface des bâtiments pilotes en fonction de l'angle d'inclinaison des murs et leurs orientations azimutales pour différents mois de l'année. L'algorithme proposé est présenté sur l'organigramme de la Figure II.3. L'interface graphique développée pour le calcul du rayonnement solaire est présentée dans le CHAPITRE III.

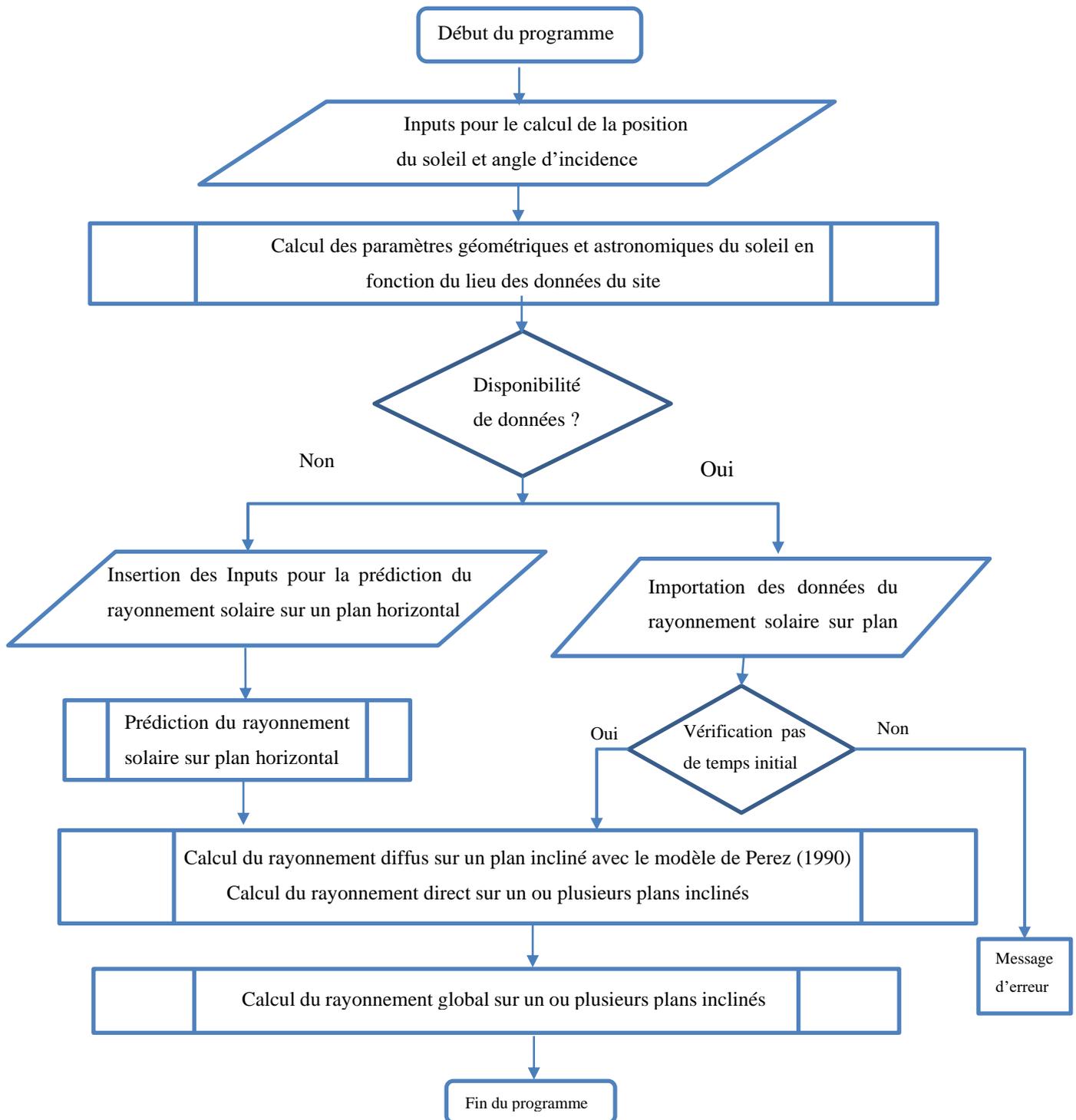


Figure II.3 Organigramme du programme de calcul du rayonnement solaire proposé



## I.2.2 Méthodologie de simulation d'ombres des bâtiments pilotes

L'ombre d'un bâtiment ensoleillé est la partie que la lumière principale ou rayonnement direct n'atteint pas en plein ensoleillement et qui est donc plus sombre appelée ombre propre. L'ombre portée d'un bâtiment correspond à son ombre propre qu'il projette sur la surface d'un autre objet ou un mur. La Figure II.1-b présente une configuration des bâtiments qu'on rencontre souvent en milieu urbain. L'objectif visé dans cette étude est d'étudier l'impact des ombres portées par les bâtiments pilotes en ne considérant uniquement le rayonnement solaire. Pour étudier l'influence entre les bâtiments, on a eu recours à la combinaison de deux logiciels.

✚ SketchUp pour la saisie de la géométrie du bâtiment

Les formes géométriques et les dimensions des bâtiments pilotes ont été modélisées à l'aide du modèleur 3D SketchUp en se basant sur les plans des bâtiments (voir Figure II.1-a et b). Il faut noter que cette modélisation des formes géométriques bâtiments prend également en compte l'orientation des différentes façades du bâtiment.

✚ Graitec Archiwizard a été utilisé pour la simulation

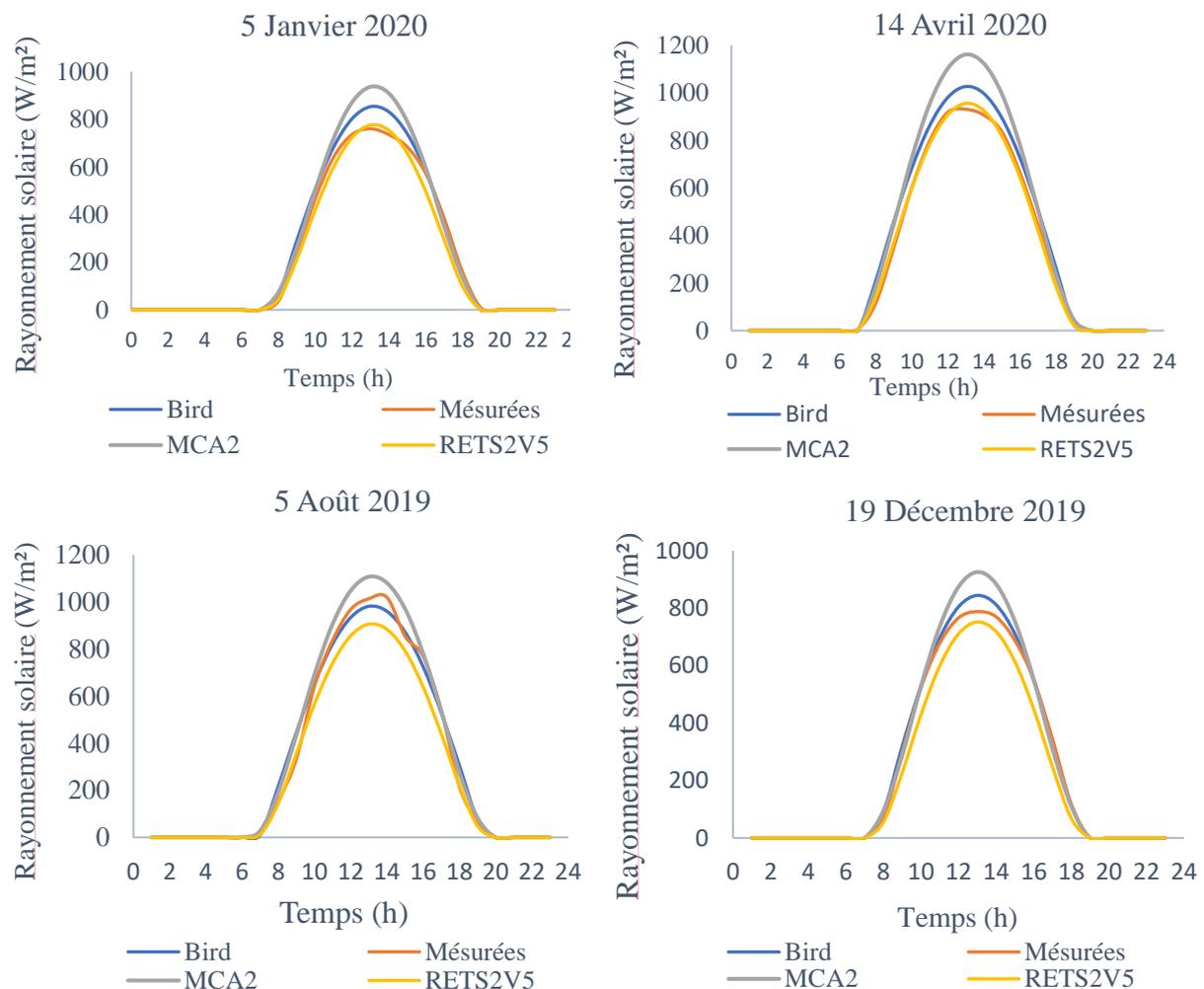
La simulation avec Graitec Archiwizard nécessite l'utilisation d'un fichier météo avec un pas de temps horaire du lieu où se trouve le bâtiment modélisé. Un fichier météo de type TMY (Typical meteorological year) a été créé à l'aide du logiciel METEONORM qui est un outil de données météorologiques. Le fichier météo TMY contient plusieurs données météo à savoir : la température ambiante, la vitesse du vent, la direction du vent, l'humidité relative et d'autres. Il convient de noter aussi que seuls les paramètres comme la hauteur du soleil, l'azimut du soleil, l'angle horaire et les données du rayonnement horizontal solaire sont nécessaires pour simuler les ombres. Les autres données sont utiles pour d'autres études liées à la performance du bâtiment à long terme comme le déphasage thermique des matériaux du bâtiment, etc.

## CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Dans cette partie, nous présenterons et discuterons des résultats de l'étude comparative des trois modèles cités précédemment. Ensuite, nous présenterons les interfaces graphiques proposées pour le calcul et la simulation du rayonnement solaire et les résultats de la simulation du flux solaire obtenu avec le modèle choisi. Enfin, nous présenterons dans cette partie les résultats de la simulation d'ombres des trois bâtiments pilotes.

### I.1 Étude comparative des modèles et analyse critique

Cette section présente les résultats de la comparaison des performances entre les modèles CSI. La Figure III.1 présente l'évolution de l'éclairement solaire incident sur une surface horizontale pour des ciels clairs. Elle met en évidence l'erreur relative commise par les trois modèles en comparaison. La comparaison s'est faite sur la base du rayonnement solaire Global (GHI). Le Tableau III.1 présente les résultats des indicateurs statistiques de performance des trois modèles en comparaison.



**Figure III.1** Courbes comparatives de l'évolution du GHI mesuré et simulé de 4 périodes de l'année



**Tableau III.1** Comparaison statistique des performances des trois modèles sur base du GHI

Jours	Mesures	Modèles		
		RETS2V5	MCA2	Bird
05-janv-20	R <sup>2</sup>	0,98547	0,98267	0,99332
14-avr-20		0,99640	0,99626	0,99270
5/Aout/2019		0,99271	0,99291	0,98617
19-déc-19		0,98898	0,98523	0,99648
Moyenne		0,99089	<b>0,98927</b>	<b>0,99217</b>
05-janv-20	MBE	-28,415	60,797	39,145
14-avr-20		-4,843	109,211	61,306
5/Aout/2019		-63,659	54,273	7,899
19-déc-19		-65,059	42,701	20,449
Moyenne		-40,494	<b>66,746</b>	<b>32,200</b>
05-janv-20	RMSE (W/m <sup>2</sup> )	43,790	92,386	52,184
14-avr-20		21,062	138,670	73,885
5/Aout/2019		86,266	67,945	52,639
19-déc-19		69,806	67,532	26,242
Moyenne		55,231	<b>91,634</b>	<b>51,238</b>

En analysant les résultats présentés dans la 0, on déduit ce qui suit :

- Le rayonnement solaire global (GHI) augmente avec l'évolution du temps jusqu'à atteindre une valeur maximale (800 à 1000 W/m<sup>2</sup>) aux environs de 12h, après il diminue jusqu'à atteindre une valeur de zéro au coucher du soleil. De plus, tous les modèles ont tendance à suivre les valeurs mesurées de 7 h à 10 h. À partir de 10h, on observe un décalage entre les modèles et la valeur mesurée. À partir de 15 h, les courbes suivent les valeurs mesurées jusqu'au coucher du soleil. Ainsi on peut voir que la différence s'observe aux environs de 10 h et 15 h.
- Par contre, nous remarquons que le flux solaire varie autour de 1000 W/m<sup>2</sup> pour le modèle MCA2 (0), avec une augmentation aux mois d'avril et août tandis que la valeur mesurée n'atteint cette valeur que dans le mois d'août. À partir de là, on remarque que le modèle MCA2 surestime la valeur mesurée du GHI. Cependant, le modèle de RETS2v5 a tendance à suivre parfaitement les valeurs mesurées pour le jour de janvier et avril alors que le modèle de Bird est beaucoup plus proche des valeurs mesurées le jour d'août.



L'analyse des valeurs du Tableau III.1 monte que :

✚ Les valeurs du coefficient de détermination  $R^2$  traduit une forte corrélation entre les GHI mesurés et estimés avec en moyenne une valeur de 0.99 pour le modèle de BIRD et RETS2v5 alors qu'elle est de 0,98 pour le modèle MCA2. Toutefois, la comparaison des valeurs du  $R^2$  obtenus pour les différents modèles montre que le modèle de Bird semble être le mieux corrélé avec une valeur maximale de 0,99217.

✚ L'erreur relative de biais moyen (MBE) permet de conclure que les modèles MCA et Bird surestiment les valeurs mesurées jusqu'à 66,746 W/m<sup>2</sup> et 32,200 W/m<sup>2</sup> en moyenne respectivement. Par contre, le MBE est très faible pour RETS2V5 et Bird respectivement pour le jour du 14 avril et 5 août. Cependant, lorsqu'on confronte les deux modèles, l'écart entre les valeurs mesurées et prédites par le modèle de Bird est le plus faible de tous en termes de valeur absolue.

✚ Les valeurs de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) calculées pour les trois modèles permettent de conclure que les données de la centrale sont mieux représentées par le modèle RETS2v5 et Bird. Toutefois, on ne remarque qu'un faible écart de 3,993 W/ m<sup>2</sup> entre les deux modèles.

### Conclusion sur le choix du modèle.

Les résultats obtenus par les indicateurs statistiques de performances sur les modèles de calcul du rayonnement solaire global de la station de 2iE se rapprochent avec une grande précision des données réelles. Ces résultats confirment en majeure partie les travaux de (Ouedraogo et al) et aussi ceux de (Sun et al.). À la lumière de cette étude, on déduit que les modèles RETS2v5 et Bird ont tous une meilleure approximation des valeurs mesurées comparées au modèle MCA2. Néanmoins, RETS2v5 à un atout supplémentaire face au modèle de Bird. En effet, l'approche de modélisation du rayonnement solaire avec le modèle RETS2v5 consiste à traiter séparément les deux bandes du spectre solaire (le visible 0,29-0,70  $\mu\text{m}$  et l'infrarouge 0,70-4.0  $\mu\text{m}$ ). Cela lui permet de dériver facilement la composante du rayonnement photosynthétiquement actif (RPA) et l'éclairement lumineux horizontal issu du soleil par ciel clair. Le RPA est défini comme le flux d'énergie contenu dans la gamme de 0,4 à 0,7  $\mu\text{m}$  et qui est utilisé dans le processus de photosynthèse par les organismes photosynthétiques. De même, les calculs et la maîtrise de l'éclairement naturel du jour sont importants dans les applications du bâtiment comme la conception bioclimatique. Ce sont ces atouts qui justifient le choix du modèle RETS2v5 pour la conception de l'outil de prédiction du rayonnement solaire. Toutefois, il faut noter que l'utilisation du modèle MCA2 peut conduire à des valeurs qui divergent, ce qui peut influencer considérablement la performance des bâtiments.



## I.2 Interface graphique développer pour l’outil de calcul et de prédiction du rayonnement solaire

1- Interface graphique pour le calcul de la position du soleil

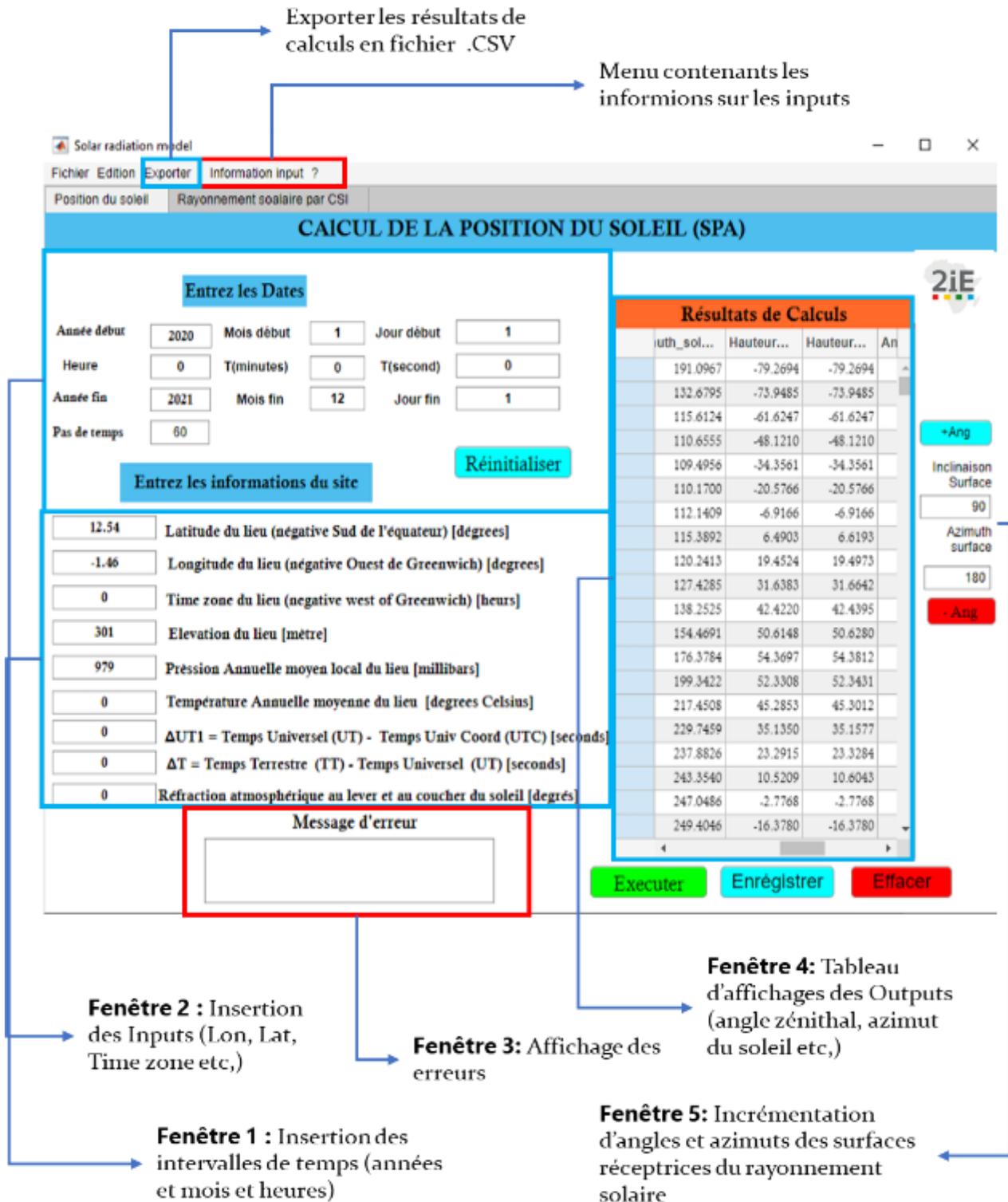


Figure III.2 Interface graphique proposée pour le calcul de la position du soleil et des angles d’incidence de différentes orientations.



2- Interface graphique pour le calcul de la position du soleil

**Fenêtre4:** Affichage graphique pour les courbes d'évolution du rayonnement solaire annuel ou mensuel

**Fenêtre 2 :** Importation des données du GHI pour l'extraction du rayonnement diffus (DHI)

**Fenêtre 1:** Insertion des Inputs des conditions atmosphériques du lieu pour la prédiction du rayonnement solaire

**Fenêtre 3:** Exécution des calculs du rayonnement solaire en fonction du modèle et enregistrements des données

Ext	GHI	DNI	DHI	Diffus_inclinés	Surface_Sud
1.3922e+03	71.4098	52.0021	63.7410	1.2242e-14	30.6903
1.3922e+03	287.8125	324.2890	162.4280	7.6308e-14	62.4854
1.3922e+03	528.3337	504.4934	226.4547	1.1867e-13	72.6482
1.3922e+03	730.7071	607.7159	264.2642	1.4292e-13	75.1298
1.3922e+03	870.7930	663.6992	285.0963	1.5607e-13	75.4173
1.3922e+03	935.7192	686.4730	293.6386	1.6141e-13	75.3181
1.3922e+03	919.9316	681.0979	291.6187	1.6015e-13	75.3519

Figure III.3 Interface graphique proposer pour la prédiction du rayonnement solaire et l'extraction du rayonnement diffus.



### I.2.1 Présentation succincte des deux interfaces graphiques

#### 1- Interface permettant de calculer la position du soleil

Sur la Figure III.2, l'interface proposée présente principalement 5 fenêtres. La première fenêtre est dédiée à l'insertion des inputs qui renseignent les caractéristiques géographiques du lieu et les pas de temps pour la simulation de la position du soleil. La seconde fenêtre permet d'afficher les résultats de la simulation pour le calcul de la position du soleil. Au bas du tableau d'affichage des résultats de la fenêtre 4, trois boutons-poussoirs sont présentés à savoir ; Exécuter, Enregistrer et Effacer. Le bouton Enregistrer permet de copier les résultats obtenus dans des variables conçus pour interchanger avec l'interface graphique 1 et 2. Le bouton principal Exécuté permet de lancer une simulation numérique sur la base des inputs de départ. Le bouton Effacer permet de supprimer des colonnes du tableau. Le bouton Réinitialiser de la fenêtre 1 permet de remettre à zéro les cases de renseignement des inputs. Le menu exporter permet d'exporter les résultats des simulations ou calculs effectués.

#### 2- Interface permettant de calculer le rayonnement solaire

Dans cette section Figure III.3, l'utilisateur a droit de choisir entre deux modèles. Le premier cas concerne les utilisateurs qui n'ont pas de données, mais dispose des données sur les conditions atmosphériques simplifiées du site considéré. Le deuxième cas concerne des utilisateurs qui disposent des données sur le rayonnement global. Ainsi dans le premier cas, les fonctionnalités sont comme décrites dans le cas de l'interface graphique 1. Pour le deuxième cas, l'utilisateur peut importer un fichier (.CSV) pour les données d'entrée en cliquant sur le bouton « Lire ». Une fenêtre sera alors ouverte qui permet à l'utilisateur de sélectionner un fichier. Ensuite, l'utilisateur peut choisir dans une liste de menu le modèle correspondant aux données d'entrée. Dans ce cas c'est le modèle de reindl2 qui permet d'extraire le rayonnement diffus du global. Par ailleurs, l'outil renferme une petite base de données qui renseigne sur la plupart des Inputs.



### I.3 Simulation numérique du rayonnement global sur les parois bioclimatiques

Une fois que nous avons choisi le modèle RETS2v5 pour le calcul du rayonnement solaire sur un plan horizontal, il s'agit ensuite d'utiliser le modèle de Perez pour convertir le rayonnement solaire global horizontal sur différentes parois d'un bâtiment que soit la direction. D'après la revue bibliographie au niveau du Chapitre I, on a pu constater que le modèle de Perez est l'un des meilleurs modèles de conversion du rayonnement solaire sur différentes parois. Dans cette partie nous présenterons les résultats de la simulation du rayonnement solaire sur les parois du bâtiment bioclimatique 1 (voir Figure II.1) par le modèle de Perez.

#### Évolution de la densité du flux solaire des parois inclinées

##### ✚ Cas de la façade des parois est et Ouest

Sur la Figure III.4 sont représentés les densités de flux solaire reçues sur les parois Est et Ouest pour différents jours des mois de janvier, avril et septembre. Nous constatons une symétrie entre l'évolution du flux solaire de chaque paroi l'une par rapport à l'autre. Pour un mois donné, le flux est maximum le matin sur la paroi est et le soir sur la paroi Ouest.

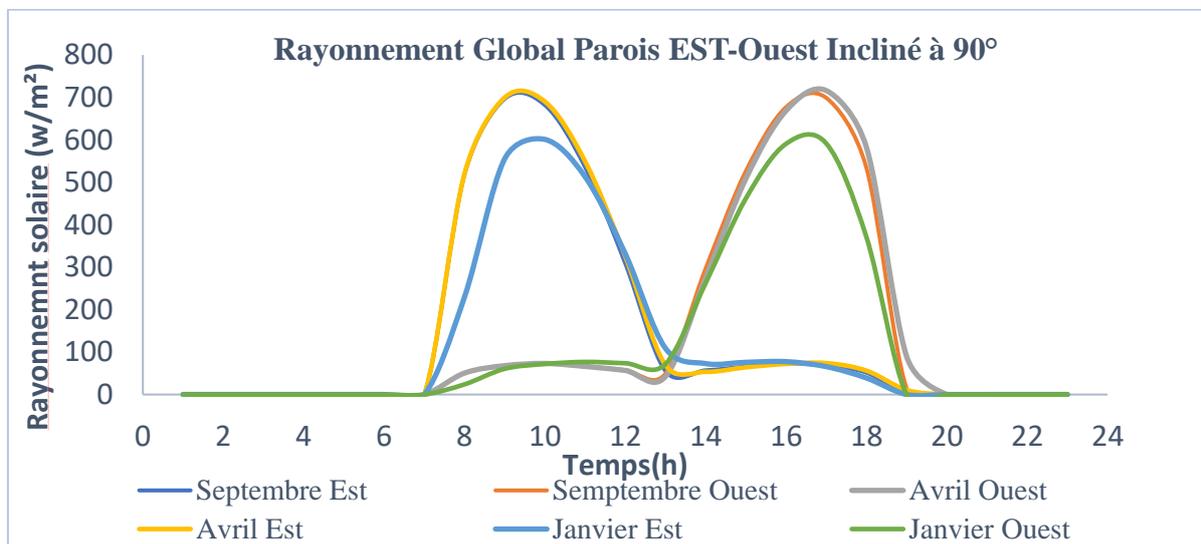


Figure III.4 Évolution de la densité des flux solaire sur les parois EST et OUEST

Le flux solaire évolue dans le sens croissant, passe par un maximum vers 09h sur la paroi EST pour les deux mois d'avril et septembre avec une valeur de 750 W/m<sup>2</sup>. Pour le mois de janvier, le pic est atteint aux environs de 10 h et son intensité est plus faible par rapport aux autres mois pour une valeur de 600 W/m<sup>2</sup>. Cela s'explique par l'évolution de la position du soleil au cours de l'année.



✚ Cas de la façade des parois Sud et Nord

La Figure III.5 ci-dessous représente une comparaison de l'évolution horaire des densités du flux solaire incident sur la façade verticale Sud et Nord de l'enveloppe de la maison bioclimatique durant journée du mois de janvier et aout. D'après cette représentation comparative entre les différentes densités du flux solaire, on conclut qu'à cause de la déclinaison solaire pendant toute l'année, les deux parois présentent des potentiels différents. La Figure III.5-a montre que la façade Nord ne reçoit que du rayonnement diffus pour le jour du mois de janvier et que la façade Sud reçoit en grande partie du rayonnement solaire d'une surface horizontale. Le processus inverse se produit sur la paroi sud en aout. Par ailleurs, si on utilisait le modèle de Liu et Jordan qui suppose que la diffusion du rayonnement solaire est isotrope, on constaterait que les deux parois recevront la même quantité de diffus pendant toutes les périodes de l'année même si elles sont situées dans différentes zones du monde. Ce qui s'explique physiquement puisqu'on sait la façade horizontale reçoit le plus grand rayonnement solaire par rapport aux façades verticales.

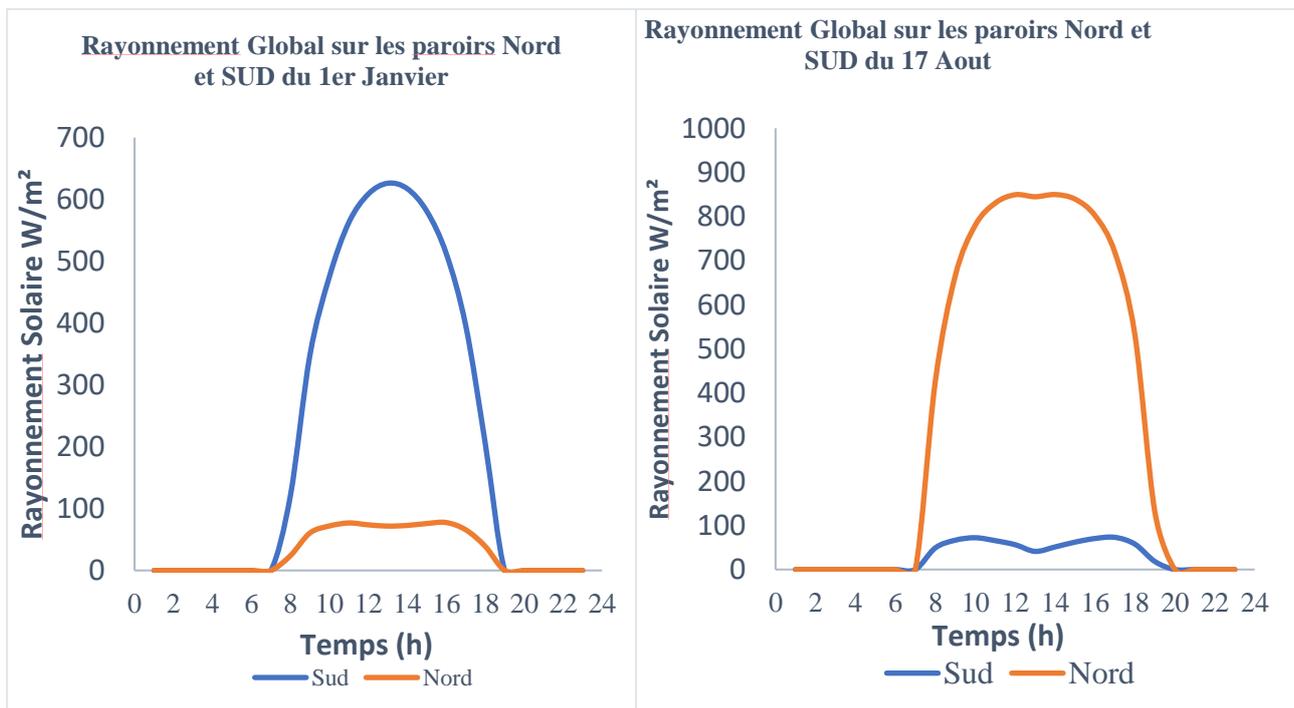


Figure III.5 Évolution de la densité des flux solaire sur les parois NORD et SUD



✚ Cas des parois de la toiture du bâtiment

La Figure III.6 présente les variations instantanées des flux solaires incidents sur les parois de la toiture du bâtiment pilotes 1. La toiture est composée de 4 parois orientées vers les quatre points cardinaux avec une inclinaison de  $30^\circ$  chacun (voir Figure II.1). Cette évolution temporelle des flux solaires est calculée durant la journée du 1er janvier 2020. Sur cette figure on remarque que le flux solaire varie et atteint des valeurs maximales de  $950 \text{ W/m}^2$  et  $400 \text{ W/m}^2$  respectivement pour les côtés Sud et Nord  $800 \text{ W/m}^2$  pour les parois Est et Ouest. Ces résultats confirment en effet les travaux de (HAMDANI, 2011) qui montrent que la toiture peut représenter à elle seule 15 à 30 % des apports solaires dans le bâtiment. Par ailleurs, on remarque qu'on peut utiliser les façades de la toiture pour d'autres fins notamment l'installation des systèmes photovoltaïques. On conclut donc que, la façade plein Sud pour la toiture du bâtiment pilote 1 est le plus optimal pour obtenir une très grande densité du flux solaire pour le jour du 1<sup>er</sup> janvier 2020.

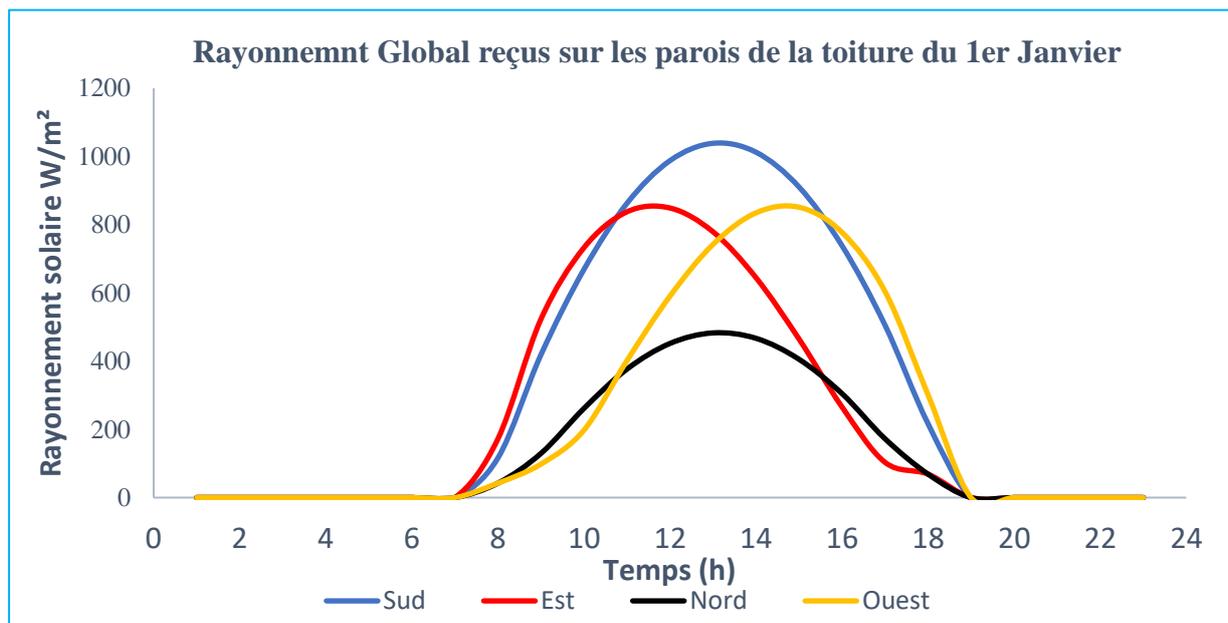


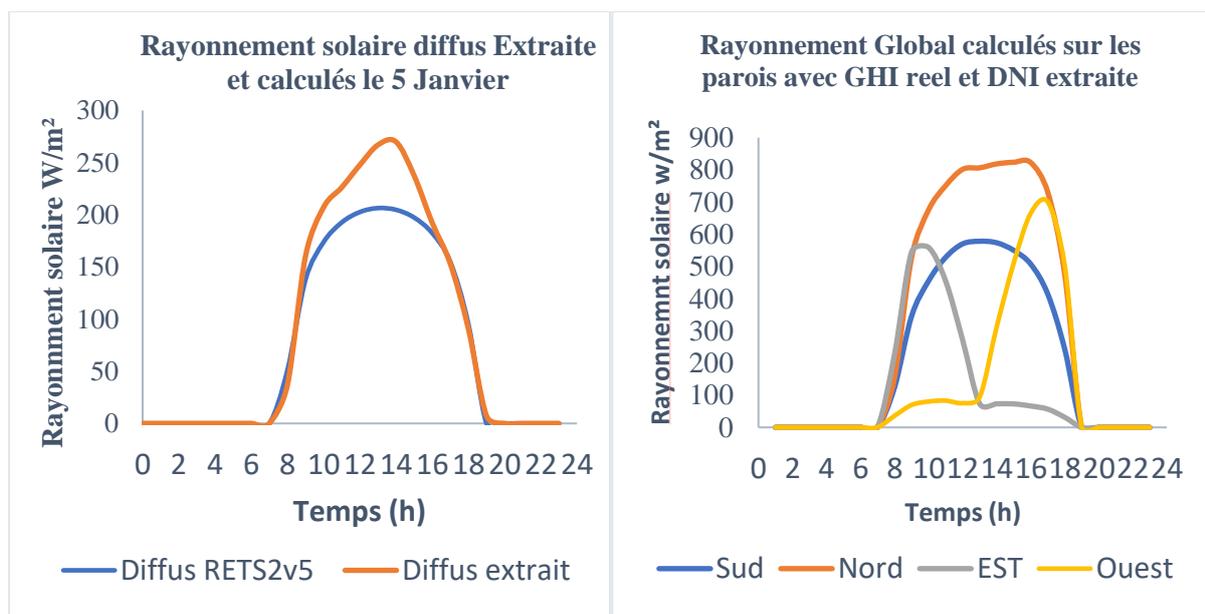
Figure III.6 Évolution de la densité des flux solaire sur les parois de la toiture

Toutefois, il est important de mettre en évidence l'avantage de l'exploitation des façades Est, Ouest, Nord et Sud. Dans un bâtiment de quatre étages, par exemple, la surface des façades est environ quatre fois la surface du toit donc l'énergie que peuvent collecter ces quatre façades serait énorme par rapport aux façades de la toiture.



### I.3.1 Modèle d'extraction du rayonnement diffus du global

Nous présentons sur la Figure III.7-a ci-dessous la simulation du modèle de décomposition du rayonnement solaire Reindl2 développer par (Reindl et al., 1990) en comparaison avec le rayonnement solaire diffus calculé par le modèle de RETS2v5. L'analyse du rayonnement diffus montre deux valeurs de pointe : 250 W/m<sup>2</sup> au midi solaire pour le modèle de Reindl2 et 200 W/m<sup>2</sup> pour RETS2v5 au cours du jour du mois de janvier. Ces résultats montrent que le modèle de RETS2v5 présente aussi de bons résultats de l'estimation du diffus. Par ailleurs, la grande majorité des modèles statistiques font intervenir des erreurs aléatoires basées sur le coefficient de corrélation kt propre à chaque région. Mais dans notre cas on pourrait bien mettre en évidence cette erreur si on disposait des données du rayonnement diffus horizontal mesuré pour mieux juger son impact sur la qualité de la simulation. La Figure III.7 b présente les résultats de la simulation des données du rayonnement solaire global calculées avec les données réelles mesurées et extraits du diffus sur différentes parois du bâtiment bioclimatique 1.



**Figure III.7** a) DNI extraite et calculée par RETS2v5, b) Rayonnement global calculé avec les données réelles.

#### Conclusion partielle sur la Simulation numérique.

Les informations sur la disponibilité du rayonnement solaire sont importantes pour la réduction du gain de chaleur solaire dans les bâtiments. Ici, nous avons pu faire une combinaison de 4 modèles (SPA, RETS2v5, Perez et Reindl2) les plus précis et cités dans la littérature. Les résultats fournis par la combinaison des modèles sont en accord avec la réalité.



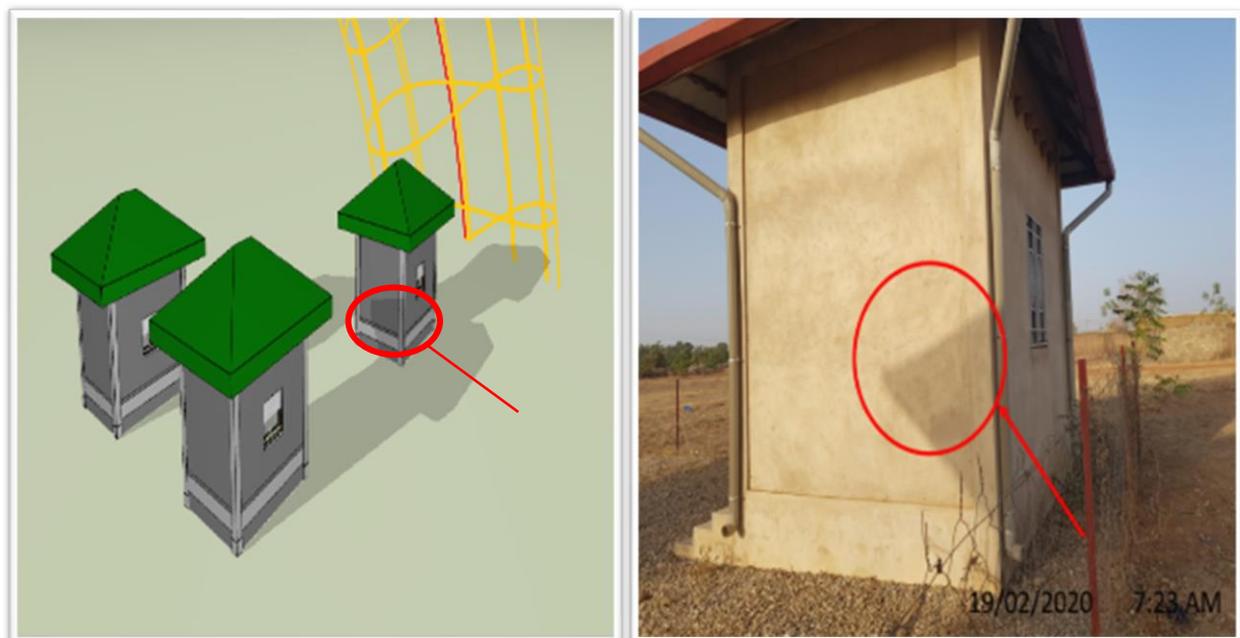
## I.4 Simulation d'ombre des bâtiments pilotes

Après simulation sur toute l'année, il a été constaté que seuls les bâtiments 1 et 2, 1 et 3 se font de l'ombrage entre eux alors que les bâtiments 2 et 3 ne sont font pas d'ombrage (voir Figure II.1 b pour la position des bâtiments). Les périodes sont délimitées dans le tableau ci-dessous.

**Tableau III.2** Période d'influence d'ombrages des bâtiments

Période	Mi-Novembre, janvier au 10 février	1 <sup>er</sup> Mars au 15 juin ; 1 <sup>er</sup> AOUT à Fin octobre	1 <sup>er</sup> Mars au 15 juin ; AOUT à Fin octobre	Mi-Mai à début aout
Bâtiment influencer	Bâtiment 3 porte par son ombrage sur le Bâtiment 1	Bâtiment 1 porte par son ombrage sur le Bâtiment 2 de 16h -30 min à 18h	Bâtiment 2 porte par son ombrage sur le Bâtiment 1 de 6h-30 min à 8h	Bâtiment 1 porte par son ombrage sur le Bâtiment 3 de 17h-15 min à 18h-25 min
Durée	2 h	2h – 30 min	2h – 30 min	1h

Pour confirmer la fiabilité et la précision de l'application, des vérifications ont été faites sur site pour la période du 19 février 2020 à 7h 23 min comme l'indiquent les figures ci-dessous

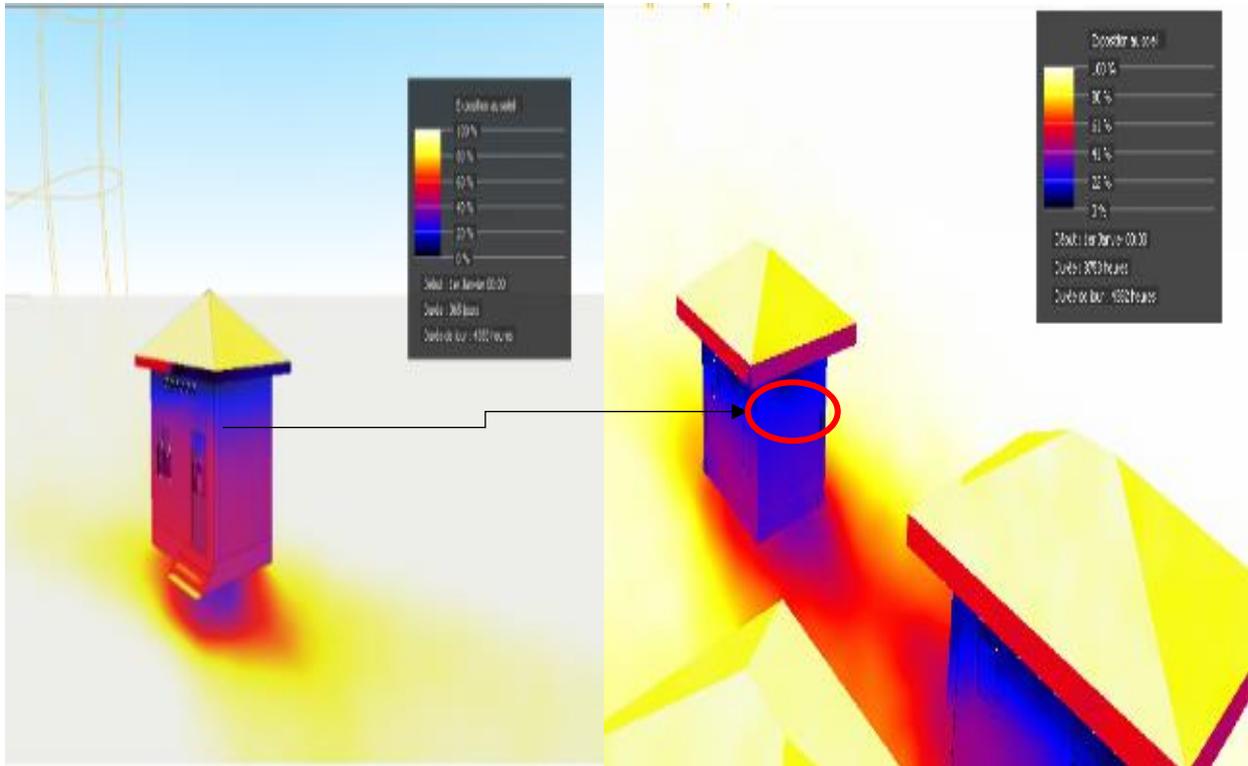


**Figure III.8** a) Ombre simulée en 3D par Sun Path le 19/02/2020 à 7h :23 min, b) Bâtiment 1 Ombre observer sur site le 19/02/2020 à 7h :23 min



#### I.4.1 Simulation thermographique sur les bâtiments

La Figure III.9 présente les résultats d'une simulation par thermographie afin de voir l'impact des ombres portées par les bâtiments.



**Figure III.9** Image thermographique d'un seul bâtiment simulé

Sur la Figure III.9-a, un seul bâtiment a été considéré lors de la simulation donc sans influence extérieure. On peut constater que sur toute l'année, le pourcentage d'exposition du mur Ouest varie de 0 à 70 %. Sur la Figure III.9-b, tous les bâtiments ont été considérés pour la simulation. On constate que les ombres portées par les bâtiments 2 et 3 influent sur le bâtiment 1 en réduisant son exposition au soleil de 15%. De ce fait, une configuration de cette façon des bâtiments en zone urbaine permettra de réduire les apports solaire en favorisant ainsi l'atteinte du confort thermique.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Une connaissance précise de la distribution des irradiances solaires à un endroit géographique donné est d'une importance majeure pour la conception et l'évaluation des performances d'un bâtiment. Néanmoins pour beaucoup de pays en voie de développement les mesures de l'éclairement solaire ne sont pas facilement disponibles. Il est donc important de répondre à cette problématique. C'est dans ce contexte que s'est déroulé ce présent travail qui avait pour objectif de proposer un outil capable d'évaluer les gains solaires à travers les parois des bâtiments dans le contexte subsaharien. Les études de ces dernières années menées dans ce sens indiquent qu'il n'existe aucun modèle universel capable de prédire le rayonnement solaire, compte tenu de la non-maitrise des conditions atmosphériques. Par contre, d'autres études ont montré que les modèles par ciel clair (CSI) constituent une composante essentielle de l'évaluation de la ressource solaire en tout lieu et interviennent dans un grand nombre d'applications. Dans la littérature, les modèles MCA2 ET RETS2v5 ont été classés meilleurs parmi tant d'autres. De ce fait, une analyse comparative a été effectuée entre les modèles RETS2v5, MCA et BIRD pour déterminer leur précision dans notre contexte d'étude. Les résultats montrent que les modèles Bird et RETSv5 aboutissent à une meilleure approximation du rayonnement solaire dans notre contexte d'étude face au modèle MCA2. Les indicateurs de performance ont montré de fortes corrélations entre les valeurs mesurées du GHI et celles mesurées sur la station météo de 2iE avec en moyenne 0.99 pour  $R^2$  pour les modèles Bird et RETSv5. Par contre on retient le modèle RETS2v5 pour la conception de notre outil de prédiction du rayonnement solaire pour répondre aux besoins d'estimation des gains solaires. Ce choix se justifie du fait que le modèle RETS2v5 peut aussi estimer l'éclairement du jour par ciel clair et qui est important pour la valorisation de l'éclairage naturel dans le secteur du bâtiment plus particulièrement la conception bioclimatique.

L'outil final proposé pour la prédiction du rayonnement solaire est une combinaison de quatre modèles à savoir RETS2v5, SPA, Perez et Reindl2. Ensuite une interface numérique a été développée pour faciliter l'accessibilité de l'algorithme proposé. Cet outil de quantification conçu a pour finalité d'être ensuite couplé à une interface professionnelle, qui soit manipulable de manière conviviale par les chercheurs, les architectes et les enseignants.

La simulation numérique du rayonnement solaire sur les parois du bâtiment pilote de 2iE a donnée des résultats qui ont montrés que les parois de la toiture reçoivent plus de rayonnement que les autres parois. Elle peut atteindre jusqu'à  $700 \text{ W/m}^2$  au midi solaire. Ces résultats prouvent donc l'importance de bien choisir l'orientation du bâtiment et la configuration architecturale de la toiture. En outre nous proposons, le modèle Randl2 pour l'extraction du



rayonnement diffus du global pour des utilisateurs disposant uniquement des données sur le rayonnement global. Le diffus extraire avec le modèle Randl2 a été comparé au diffus calculés par RETS2v5. Les résultats ont montré qu'ils sont en adéquation. Enfin une simulation d'ombre et une simulation thermographie ont été réalisées sur les bâtiments pilotes dans le but d'étudier l'influence de l'ombre créée par les bâtiments voisins. Les résultats nous on permit de constater que l'ombre reçu par un bâtiment peut réduire jusqu'à 15 % du flux radiatif annuel reçu par la paroi sur laquelle elle fait de l'ombre.



## RECOMMANDATIONS

Bien que le rayonnement solaire soit le paramètre le plus influent sur la consommation énergétique des bâtiments, il est suivi en importance par les flux convectifs. Il est donc nécessaire d'effectuer une simulation détaillée du rayonnement infrarouge et des flux convectifs. De plus, le modèle RETS2v5 nous offre cet avantage de quantifier la lumière du jour par ciel clair et nous recommandons d'étudier l'éclairage du jour qui peut être prédit par le modèle RETS2v5 comparés à des valeurs mesurées in situ. Nous recommandons ensuite de réparer l'instrument de mesure du diffus de la station météo dans le but de peaufiner les résultats précédents. Ensuite, il serait intéressant de combiner d'autres types de modèles de calcul thermique dans le programme à savoir : conduction et convection pour le bilan des chaleurs des bâtiments. Des méthodes de dimensionnement des masques solaires pour la protection des bâtiments, etc. Enfin, nous recommandons d'étudier de façons pratiques jusqu'à quel point l'influence des ombres portées par les bâtiments pilotes peut affecter la température des parois obstruées par les ombres portées.

## BIBLIOGRAPHIE

- Alsadi, S., Nassar, Y., 2016. Correction of the ASHRAE clear-sky model parameters based on solar radiation measurements in the Arabic countries.
- Babikir, M.H., Njomo, D., Barka, M., Khayal, M.Y., Goron, D., Chara-Dackou, V.S., Martial, T.T., Romeo, K.L.D., Paul, G.J., Elie, N.S., 2020. Modeling the incident solar radiation of the city of N'Djamena (Chad) by the Capderou method. *International Journal of Photoenergy* 2020.
- Bird, R.E., Riordan, C., 1986. Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the earth's surface for cloudless atmospheres. *Journal of climate and applied meteorology* 25, 87–97.
- Blanc, P., Wald, L., 2015. L'estimation du rayonnement solaire au sol par la nouvelle méthode Heliosat-4.
- Blanc, P., Wald, L., 2012. The SG2 algorithm for a fast and accurate computation of the position of the Sun for multi-decadal time period. *Solar Energy* 86, 3072–3083.
- Brent, A.C., Hinkley, J., Burmester, D., Rayudu, R., 2020. Solar Atlas of New Zealand from satellite imagery. *Journal of the Royal Society of New Zealand* 1–12.
- Capderou, M., 1987. Atlas Solaire de l'Algérie, modèles théoriques et expérimentaux. Vol. 1, T1, Office des Publications Universitaires, Algérie.
- Carneiro, C.M., 2011. Extraction of urban environmental quality indicators using LiDAR-based Digital Surface Models (PhD Thesis). Verlag nicht ermittelbar.
- Chauvin, R., 2016. Évaluation de la ressource solaire pour la gestion optimisée de centrales CSP (PhD Thesis). Perpignan.
- Chuayb, H.M.A., n.d. Application de quelques notions de la conception bioclimatique pour l'amélioration de la température interne d'un habitat. (PhD Thesis).
- Coulibaly, O., Ouedraogo, A., 2016. Correlation of global solar radiation of eight synoptic stations in Burkina Faso based on linear and multiple linear regression methods. *Journal of Solar Energy* 2016, 9.
- Coulibaly, Y., 2019. Economie d'énergie dans le bâtiment et dans l'entreprise.
- Davies, J.A., McKay, D.C., 1982. Estimating solar irradiance and components. *Solar Energy* 29, 55–64.
- De Herde, A., Liébard, A., 2005. *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques : concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*.
- Duan, Q., Feng, Y., Zhang, E., Song, Y., Wang, J., Niu, S., 2020. Solar Infrared Radiation

- towards Building Energy Efficiency: Measurement, Data, and Modeling. Environmental Reviews.
- Eicker, U., 2006. Solar technologies for buildings. John Wiley & Sons.
- Frayssinet, L., Berthou, T., Duplessis, B., Tavella, J.-P., Kuznik, F., Hubert, J.-L., Roux, J.-J., 2018. Incertitude de simulation à l'échelle du quartier: comparaison de deux modèles et analyse de sensibilité.
- Free maps and GIS data / Overview | Solargis [WWW Document], n.d. URL <https://solargis.com/maps-and-gis-data/overview> (accessed 9.7.20).
- Gado, I.H., Sani, I.I., Nafissa, I.A., 2018. Estimation du potentiel d'économie d'énergie électrique dans le secteur du bâtiment au Niger: cas du site de l'IUT de l'Université Dan Dicko Dankoulodo de Maradi. *Revue des Energies Renouvelables* 21, 141–154.
- Gallauziaux, T., Fedullo, D., 2010. Le grand livre de l'isolation. Eyrolles.
- Grena, R., 2008. An algorithm for the computation of the solar position. *Solar Energy* 82, 462–470.
- GUENGANE, H., Nébon, B., NANA, G.G., BAILOU, O., 2019. Contribution to the estimation of the solar potential on the ground by semi-empirical methods and based on the thermal zoning of Burkina Faso. *Asian Journal of Science and Technology* 10, 10545–10555.
- Gueymard, C.A., 2018. A reevaluation of the solar constant based on a 42-year total solar irradiance time series and a reconciliation of spaceborne observations. *Solar Energy, Advances in Solar Resource Assessment and Forecasting* 168, 2–9. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.001>
- Gueymard, C.A., 2008. REST2: High-performance solar radiation model for cloudless-sky irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation – Validation with a benchmark dataset. *Solar Energy* 82, 272–285. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.04.008>
- Gueymard, C.A., Thevenard, D., 2009. Monthly average clear-sky broadband irradiance database for worldwide solar heat gain and building cooling load calculations. *Solar Energy* 83, 1998–2018.
- HAMDANI, M., 2011. Étude et Effet de l'Orientation de deux Pièces d'un Habitat en Pierre Situé à Ghardaïa.
- Hay, J.E., 1979. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces. *Solar energy* 23, 301–307.
- Ibeh, G.F., Agbo, G.A., Rabia, S., Chkwenze, A.R., 2012. Comparison of empirical and artificial neural network models for the correlation of monthly average global solar



- radiation with sunshine hours in Minna, Niger State, Nigeria. *International Journal of Physical Sciences* 7, 1162–1165.
- Ideriah, F.J.K., 1981. A model for calculating direct and diffuse solar radiation. *Solar Energy* 26, 447–452.
- Iqbal, M., 2012. *An introduction to solar radiation*. Elsevier.
- Klucher, T.M., 1979. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. *Solar energy* 23, 111–114.
- Lean, J.L., 2001. Solar irradiance and climate forcing in the near future. *Geophysical Research Letters* 28, 4119–4122.
- Leckner, B., 1978. The spectral distribution of solar radiation at the earth's surface—elements of a model. *Solar energy* 20, 143–150.
- Liu, B.Y., Jordan, R.C., 1960. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar energy* 4, 1–19.
- MALAWI, P.O., 2018. SOLAR MODEL VALIDATION REPORT.
- Mesri-Merad, M., Rougab, I., Cheknane, A., Bachari, N.I., 2012. Estimation du rayonnement solaire au sol par des modèles semi-empiriques. *Revue des Energies Renouvelables* 15, 451–463.
- Michalsky, J.J., 1988. The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position (1950–2050). *Solar energy* 40, 227–235.
- Multon, B., 1998. *L'énergie sur la terre: analyse des ressources et de la consommation. La place de l'énergie électrique*.
- N'Gobi, G.K., Donnou, H.E.V., Agbazo, M., Akpo, A.B., Kounouhewa, B.B., n.d. Estimation of the Global Solar Radiation Received on the Soil in Nalohou and Natitingou (Northern Benin).
- Pazikadin, A.R., Rifai, D., Ali, K., Malik, M.Z., Abdalla, A.N., Faraj, M.A., 2020. Solar irradiance measurement instrumentation and power solar generation forecasting based on Artificial Neural Networks (ANN): A review of five years research trend. *Science of The Total Environment* 715, 136848.
- Reda, I., Andreas, A., 2004. Solar position algorithm for solar radiation applications. *Solar energy* 76, 577–589.
- Reindl, D.T., Beckman, W.A., Duffie, J.A., 1990. Diffuse fraction correlations. *Solar Energy* 45, 1–7. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90060-P](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90060-P)
- Rigollier, C., Bauer, O., Wald, L., 2000. On the clear sky model of the ESRA—European Solar Radiation Atlas—with respect to the Heliosat method. *Solar energy* 68, 33–48.



- Ruiz-Arias, J.A., Gueymard, C.A., 2018. Worldwide inter-comparison of clear-sky solar radiation models: Consensus-based review of direct and global irradiance components simulated at the earth surface. *Solar Energy* 168, 10–29.
- Sanchez, D.G., Lacarrière, B., Musy, M., Bourges, B., 2014. Application of sensitivity analysis in building energy simulations: Combining first-and second-order elementary effects methods. *Energy and Buildings* 68, 741–750.
- Sengupta, M., Gotseff, P., 2013. Evaluation of clear sky models for satellite-based irradiance estimates. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- Spitz, C., 2012. Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments (PhD Thesis).
- Sun, X., Bright, J.M., Gueymard, C.A., Acord, B., Wang, P., Engerer, N.A., 2019. Worldwide performance assessment of 75 global clear-sky irradiance models using principal component analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 111, 550–570.
- Temps, R.C., Coulson, K.L., 1977. Solar radiation incident upon slopes of different orientations. *Solar energy* 19, 179–184.
- Tobiska, W.K., 2000. Status of the SOLAR2000 solar irradiance model. *Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science* 25, 383–386.
- Yettou, F., Malek, A., Haddadi, M., Gama, A., 2009. Etude comparative de deux modèles de calcul du rayonnement solaire par ciel clair en Algérie. *Revue des Energies Renouvelables* 12, 331–346.
- Zeroual, D., 2006. Impact des gains de chaleur sur la morphologie des bâtiments. Cas des climats chauds et arides.



## LISTES DES ANNEXES

Annexe I : Formule de calcul de la masse d'air optique pour le modèle BIRD .....	48
Annexe 2 : Fiches techniques des appareils de mesure de l'éclairement solaire de la station météo de 2iE.....	50
Annexe 3 : Algorithme de calcul de la position du soleil .....	52
Annexe 4 : Équation des modèles de calcul du rayonnement solaire .....	60



ANNEXE I : FORMULE DE CALCUL DE LA MASSE D'AIR OPTIQUE POUR LE MODELE BIRD

Masse d'air relative à la hauteur d'eau condensable

$$m_{\omega} = \left[ \frac{1}{\cos \theta_z + 0.0548 \times (92.65 - \theta_z)^{-1.452}} \right] \quad (1)$$

Avec  $\cos \theta_z$  étant la distance zénithale

• Masse d'air relative  $m_r$

$$m_a = \frac{1}{\sin h + 9.4 \times 10^{-4} (\sin(h) + 0.0678)^{-1.253}} \quad (2)$$

• Masse d'air corrigée

$$m_r = m_a \times \left( \frac{p}{1013.25} \right)^{-1} \quad (3)$$

Avec : p (mbar) est la pression atmosphérique locale

$m_r$  (sans dimension) est la masse d'air à la pression standard (1013,25 mbar)

$$U_3 = I_{oz} \times m_r \quad (4)$$

$$U_1 = \omega \times m_r \quad (5)$$

$U_3$  (cm) est la longueur de parcours optique relative de l'ozone à température et pression de surface normales

• Hauteur d'eau condensable

$$\omega = \omega_0 \times \left( \frac{p}{1013.25} \right)^{\frac{3}{4}} \times \left( \frac{273}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$T = 228 - 6.5 \times 10^{-3} \times z \quad (7)$$

$z$  (m) qui est l'altitude du site considéré en mètre.

Tableau 1.1

$\omega$  (cm) est l'épaisseur de la vapeur d'eau précipitable réduite à la pression standard et à la température T de 273 K ;

Avec T (K) la température ambiante moyenne annuelle de la zone considérée.

(8)

$$p = 1013 \times (1 - 2.57 \times 10^{-5} \times z)^{5.26}$$

$$I_{oz} = \frac{1}{9.4 + 0.9 \times m_a}$$

(9)



$I_{oz}$  (cm) est l'épaisseur verticale de la couche d'ozone

Tableau 1 : Coefficient d'Angström

Zone climatique	$\beta A$	$\alpha A$
Site rural	0.05	0.11
Site urban	0.10	0.22
Site Industrial	0.30	0.66

Tableau 2 : Classement du type de ciel en fonction de la clarté du ciel ( $\epsilon$ ) pour le modèle de Perez (1990)

	Clarté du ciel ( $\epsilon$ )	Type de ciel
1	1.000 – 1.065	Ciel couvert avec l'horizon sombre
2	1.065 – 1.230	
3	1.230 – 1.500	Intermédiaire
4	1.500 – 1.950	
5	1.950 – 2.800	
6	2.800 – 4.500	Trouble
7	4.500 – 6.200	
8	6.200 – 12.000	Ciel sans nuages et très clair

Avec ces huit conditions du ciel, nous pouvons déterminer les paramètres  $f_{ii}$  pour calculer les coefficients d'anisotropie en fonction de  $\epsilon$  du Tableau 3

Tableau 3 : Coefficients du modèle de ciel de Perez (1990)

		Clarté du ciel							
Type de ciel	Couvert	Intermédiaire					Claire		
		$\epsilon$ de	1.000	1.065	1.230	1.500	1.950	2.800	4.500
	jusqu'à	1.065	1.230	1.500	1.950	2.800	4.500	6.200	-
		Coefficients							
f11		-0,0083117	0,1299457	0,3296958	0,5682053	0,8730280	1,1326077	1,0601591	0,6777470
f12		0,5877285	0,6825954	0,4868735	0,1874525	-0,3920403	-1,2367284	-1,5999137	-0,3272588
f13		-0,0620636	-0,1513752	-0,2210958	-0,2951290	-0,3616149	-0,4118494	-0,3589221	-0,2504286
f21		-0,0596012	-0,0189325	0,0554140	0,1088631	0,2255647	0,2877813	0,2642124	0,1561313
f22		0,0721249	0,0659650	-0,0639588	-0,1519229	-0,4620442	-0,8230357	-1,1272340	-1,3765031
f23		-0,0220216	-0,0288748	-0,0260542	-0,0139754	0,0012448	0,0558651	0,1310694	0,2506212

Sites internet de la Nasa ; AERONET : <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>



## Annexe 2 : Fiches techniques des appareils de mesure de l'éclairement solaire de la station météo de 2iE

- Sun Tracker

Le système de suivi automatique du soleil SOLYS 2 permet au pyrhéliomètre de mesurer le rayonnement direct. Une fois équipés du kit d'ombrage et d'un pyranomètre, il devient possible de mesurer également le rayonnement diffus sans aucun ajustement manuel.



Performance	SOLYS 2	2AP
Précision	< 0.05 °	< 0.05 °
Couple	20 N/m	40 N/m
Charge utile (équilibrée)	20 kg	65 kg
Vitesse angulaire	Jusqu'à 5 °/s	Jusqu'à 1.8 °/s
Accélération angulaire	Jusqu'à 6 °/s²	Jusqu'à 6 °/s²
<b>Conditionnement et Dimensions</b>		
Tension d'entrée	18 à 30 VDC et 90 à 264 VAC, 50 / 60 Hz	24 VDC uniquement ou 115 / 230 VAC (biphasé), 50 / 60 Hz
Consommation électrique	21 W (réduit à 13 W la nuit)	50 W
Capacité chauffage	100 W (AC uniquement)	100 W (chauffage optionnel)
Operating temperature range	20 °C à 150 °C (DC) -40 °C à +50 °C (AC)	0 °C à 150 °C -20 °C à +50 °C avec couverture froid optionnelle 50 °C à 150 °C avec couverture froid et chauffage optionnels
Poids	23 kg (tracker), 5 kg (trépied)	30 kg
Dimensions (l x P x H)	50 x 34 x 38 cm (sans trépied)	47 x 26 x 38 cm
<b>Caractéristiques</b>		
Transmission	Ceinture à dents inversées	Engrenage
Position, heure/date et configuration	Automatique par GPS intégré	Manuel via logiciel Win2AP et PC
Base de montage	Trépied intégré	Plat base plate (optionnel trépied et tube d'extension hauteur)
Fixation zénithale	Plaque de montage sur le côté + kit de fixation pour pyrhéliomètre	Deux plaques de montage sur le côté, sans les fixations
Chauffage pour région froide	Inclut (AC uniquement)	Optionnel (must be used with cold cover)
Connexion	Ethernet et interface web	RS232 et logiciel Win2AP pour PC
Indicateurs	Alimentation électrique, température et état du Solys 2	N/A
Mode de positionnement	Ethernet et interface web	Via logiciel Win2AP et PC
Maintenance	Ris de maintenance programmée	Inspection annuelle et graissage des roues
<b>Options</b>		
Kit-sun sensor	Pour balayage actif	Pour balayage actif
Plaque de montage côté	Pour fixer un pyrhéliomètre de l'autre côté du Solys 2	Pour fixer deux pyrhéliomètres
Grande plaque de montage horizontale	Pour monter jusqu'à 3 radiomètres Kipp & Zonen (ventilés ou non ventilés)	N/A
Petite plaque de montage horizontale	Pour monter un radiomètre Kipp & Zonen (ventilés ou non ventilés)	N/A
Kit d'ombrage	Inclut grande plaque de montage horizontale, plaque de montage côté et deux boules d'ombrage et leurs supports	Inclut plaque de montage horizontale pour 3 radiomètres Kipp & Zonen ventilés, deux plaques de montage côté et 3 boules d'ombrage et leurs supports
Kit adaptateur	Non nécessaire	Pour radiomètres non ventilés
Radiometer mounting kits	For absolute cavities, pyrheometers, PGS-100 sun photometer and other instruments	

Nota: Les spécifications dans le tableau sont le plus mauvais cas ou le minimum et/ou maximum

Figure 1: Fiche technique du Sun Tracker de la station météo de 2iE

▪ Pyranomètre

Le pyranomètre de type CMP11 est celui qui est utilisé sur la station météo de 2iE pour mesurer le rayonnement solaire.

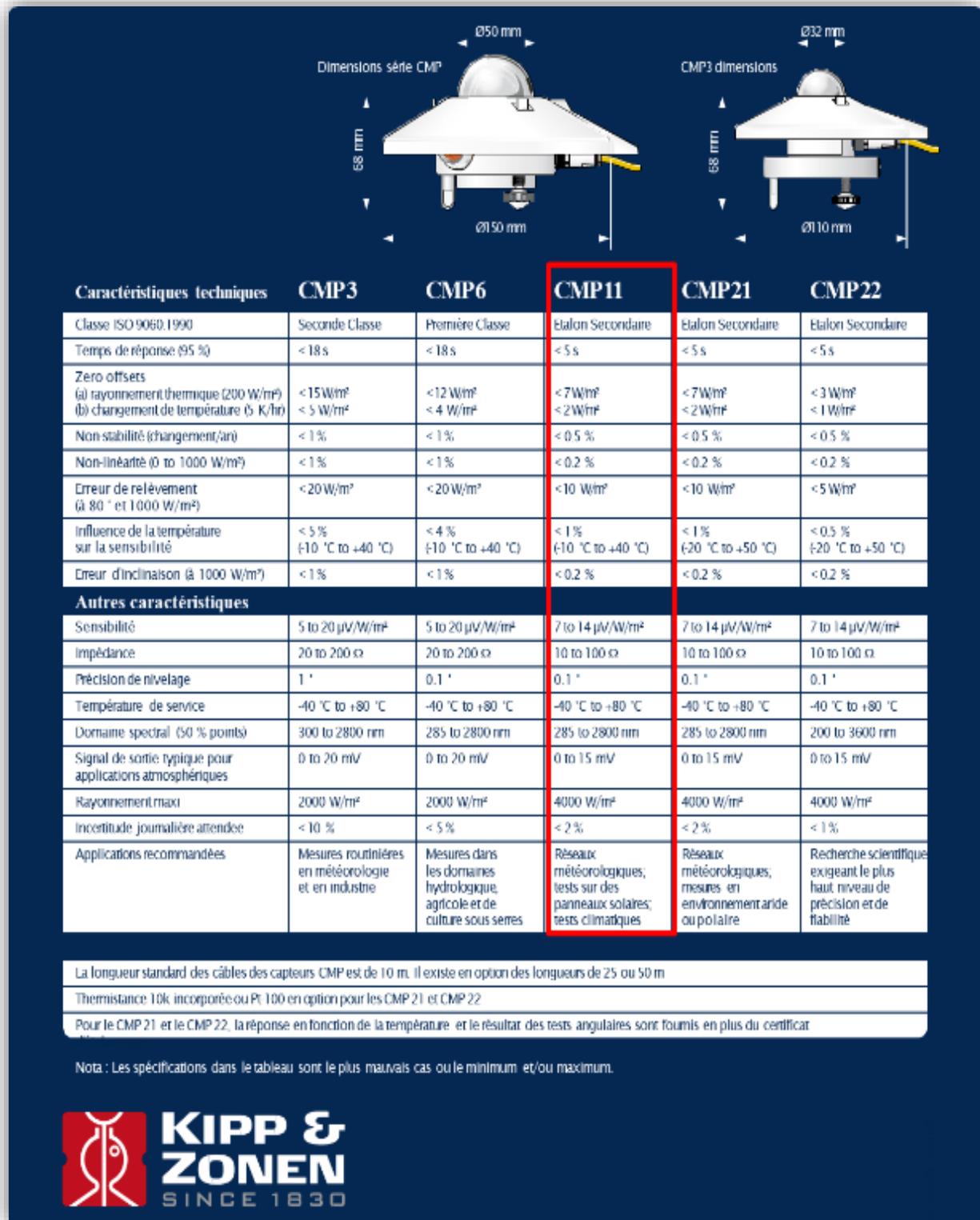


Figure 2: Fiche technique des pyranomètres de la station météo de 2iE



### Annexe 3 : Algorithme de calcul de la position du soleil

Solar Position Algorithm (SPA) : les équations présenter ici sont issus des travaux de (Reda and Andreas, 2004)

#### Méthodologie

Description des équations utiliser dans l'algorithme.

Nous commençons cette partie par :

- A- Description des échelles de temps en raison de l'importance d'utiliser le temps correct dans le programme SPA
- B- Fournir une procédure étape par étape pour calculer la position solaire.
- C- Résumer des input et output de l'algorithme. Valable aussi pour le programme développer sous MATLAB pour le calcul du rayonnement solaire.

#### Échelle de Temps

Définition des échelles de temps utiliser

Le temps universel (TU), ou temps civil de Greenwich est basé sur la rotation de la Terre et est compté à partir de 0 heure à minuit ; l'unité est le jour solaire moyen. L'UT est l'heure utilisée pour calculer la position du soleil dans l'algorithme décrit. Elle est parfois appelée UT1.

Le Temps atomique international (TAI) est la durée de la seconde internationale du système (SI-seconde) et est basé sur un grand nombre d'horloges atomiques.

Le temps universel coordonné (UTC) est la base de la plupart des signaux horaires radio et des systèmes de temps légaux. Il est maintenu à 0,9 seconde près de UT1 (UT) en introduisant des pas d'une seconde à sa valeur (seconde intercalaire) ; à ce jour, les pas sont toujours positifs.

Le temps terrestre dynamique ou temps terrestre (TDT ou TT) est l'échelle de temps des éphémérides (temps éphémérides : ni le temps sidéral ne sont précis, car la rotation de la Terre sur elle-même n'est régulière. Il se définit selon le mouvement de la Terre autour du soleil et possède la même position de base que le temps sidéral, le point vernal) pour les observations de la surface de la Terre.

Les équations suivantes décrivent la relation entre ces différentes échelles de temps.

$$TT = TAI + 32.184 \quad (10)$$

$$UT = TT - \Delta T \quad (11)$$

Ou  $\Delta T$  est la différence entre le temps de rotation de la Terre et le temps terrestre dynamique (TT).

Elle est dérivée seulement de l'observation reporter annuellement dans Astronomical



Almanac

$$UT = UT1 = UTC + \Delta UT1 \quad (12)$$

Où  $\Delta UT1$  est la fraction d'une seconde, valeur positive ou négative, qui est ajoutée à UTC pour ajuster le taux d'irrégularité de la rotation de la terre.

Procédure de calcul de la position du soleil

### 1. Calcul du jour Julian et le jour Julian Ephemeris

La date julienne commence le 1er janvier de l'année - 4712 à 12h00 UT. Le jour julien (JD) est calculé en utilisant UT et le jour julien des éphémérides (JDE) est calculé en utilisant TT. Dans les étapes suivantes, notez qu'il y a un écart de 10 jours entre le calendrier julien et le calendrier grégorien, où le calendrier julien se termine le 4 octobre 1582 (JD = 2299160), et après 10 jours, le calendrier grégorien commence le 15 octobre 1582.

Calcul du jour Julian (JD)

$$JD = \text{INT} (365.25*(Y+ 4716)) + \text{INT} (30.6001*(M+1)) + D+B-1524.5 \quad (13)$$

Où

- INT : est la partie entière des termes de calcul
- Y : est l'année
- M : est le mois de l'année
- D : est le jour du mois avec un temps décimal (par exemple, pour le deuxième jour du mois à 12h30 TU, D = 2,521180556).
- B : est égal à 0, pour le calendrier julien {c'est-à-dire en utilisant B = 0 dans l'équation 4, JD < 2299160}, et égal à (2 - A + INT (A/4)) pour le calendrier grégorien {c'est-à-dire en utilisant B = 0 dans l'équation 4, JD > 2299160}, où A = INT(Y/100).

Pour les utilisateurs qui souhaitent utiliser leur heure locale au lieu de l'heure d'été, changer, il faut juste changer le fuseau horaire en une fraction de jour (en le divisant par 24), puis soustraire le résultat de JD.

NB : Notez que la fraction est soustraite de JD calculé avant le test pour B < 2299160 pour maintenir les périodes julienne et grégorienne.

### 2. Calcul du Jour Julian Ephemeris (JDE)

$$JDE = JD + \frac{\Delta T}{86400} \quad (14)$$

3. Calculer le siècle julien (JC) et le siècle des éphémérides juliennes (JCE) pour l'époque standard de 2000

$$JC = \frac{JD - 2451545}{36525} \quad (15)$$

$$JCE = \frac{JDE - 2451545}{36525} \quad (16)$$

4. Calculer le millénaire des éphémérides juliennes (JME) pour l'époque standard de 2000,

$$JME = \frac{JCE}{10} \quad (17)$$

5. Calculer le vecteur de longitude, de latitude et de rayon héliocentrique de la Terre (L, B et R) :

"Héliocentrique" signifie que la position de la Terre est calculée par rapport au centre du soleil.

6. Pour chaque ligne de la table A4.2, calculez le terme  $L0_i$  (en radian),

$$L_{0i} = A_i \times \cos(B_i + C_i \times JME), \quad (18)$$

Où

- $i$  est la  $i$  eme ligne du terme  $L0$  dans la Table A4.2.
- $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  sont les valeurs de la  $i$  eme ligne et les colonnes A,B, et C dans la table A4.2 pour le terme  $L0$  (en radians)

1. Calcul du terme  $L0$  (en radians)

$$L0 = \sum_{i=0}^n L0_i \quad (19)$$

Où  $n$  est le nombre de lignes du terme  $L0$  dans le tableau A4.2.

Calcule des termes  $L1$ ,  $L2$ ,  $L3$ ,  $L4$ , et  $L5$  par l'utilisation des équations 43 et 44 et changer les 0,1,2,3,4, et 5, et par l'utilisation de leur valeur correspondant aux colonnes A, B, et C dans la table A4.2 (en radiant).

7. Calculer calcul de  $L$

$$L = \frac{L0 + L1 \times JME + L2 \times JME^2 + L3 \times JME^3 + L4 \times JME^4 + L5 \times JME^5}{10^8} \quad (20)$$

8. Calculer  $L$  en degré,



$$L = \frac{L(\text{ en Radians}) \times 180}{\pi} \quad (21)$$

Où  $\pi$  est approximativement égale à 3.1415926535898.

Limiter L à la plage de 0 à 360°. Cela peut être réalisé en divisant L par 360 et en enregistrant la fraction décimale de la division comme F. Si L est positif, alors la L limitée = 360 \* F. Si L est négatif, alors la L limitée = 360 - 360 \* F.

9. Calculer la latitude héliocentrique de la Terre, B (en degrés), en utilisant le tableau A4.2 et en remplaçant tous les L par des B dans toutes les équations. Notez qu'il n'y a pas de B2 à B5, par conséquent, remplacez-les par zéro
10. calculer le vecteur rayon de la Terre, R (en unités astronomiques, AU), en répétant l'étape 3.2.7 et en remplaçant tous les L par des R dans toutes les équations. Notez qu'il n'y a pas de R5, par conséquent, remplacez-le par zéro dans les étapes.
11. Calculer la longitude et la latitude géocentriques ( $\theta$  et  $\beta$ )

"Géocentrique" signifie que la position du soleil est calculée par rapport au centre de la Terre

12. Calcule de la longitude géocentrique ( $\theta$ ) en degré avec l'équation 45

$$\theta = L + 180 \quad (22)$$

Limiter  $\theta$  l'intervalle de 0 à 360 comme décrit en étape 8

Calculer la latitude géocentrique  $\beta$  en degré

$$\beta = -B$$

13. Calculer la nutation en longitude et en obliquité ( $\Delta\psi$  et  $\Delta\epsilon$ ) en procédant comme suit :

➤ Calculer l'élongation moyenne de la lune par rapport au soleil,  $\chi_0$  en degrés

$$\chi_0 = 297,85036 + 445267,111480 \times JCE - 0,0019142 JCE^2 \times \frac{JCE^3}{189474} \quad (23)$$

- Calculer l'anomalie moyenne du soleil (Terre),  $\chi_1$  (en degrés),

$$\chi_1 = 357,52772 + 35999,050340 \times JCE - 0,0001603 \times JCE^2 \times \frac{JCE^3}{300000} \quad (24)$$

- Calculer l'anomalie moyenne de la lune,  $\chi_2$  (en degrés),

$$\chi_2 = 357,52772 + 35999,050340 \times JCE - 0,0001603 \times JCE^2 \times \frac{JCE^3}{300000} \quad (25)$$

➤ Calculer l'argument de la latitude de la lune,  $\chi_3$  (en degrés),

$$\chi_3 = 93,27191 + 483202,017538 \times JCE - 0,0036825 \times JCE^2 \times \frac{JCE^3}{327270} \quad (26)$$

14. Calculer la longitude du nœud ascendant de l'orbite moyenne de la lune sur l'écliptique, mesurée à partir de l'équinoxe moyen de la date,  $\chi_4$  (en degrés),

$$\chi_4 = 125,04452 - 1934,136261 \times JCE - 0,0020708 \times JCE^2 \times \frac{JCE^3}{450000} \quad (27)$$

15. Pour chaque ligne du tableau A4.3, calculer les termes)  $\Delta\psi_i$  et  $\Delta\epsilon_i$  (en 0,0001 de seconde d'arc),

$$\Delta\psi_i = (a_i + b_i \times JCE) \times \sin\left(\sum_{j=0}^4 X_j \times Y_{i,j}\right), \quad (28)$$

$$\Delta\epsilon_i = (C_i + d_i \times JCE) \times \cos\left(\sum_{j=0}^4 X_j \times Y_{i,j}\right), \quad (29)$$

Où

$a_i + b_i + C_i + d_i$  sont les valeurs indiquées au i -ème ligne et dans les colonnes a,

$b, c, d$  du tableau A4.3.

- $X_j$  est le j-ème X calculés à l'aide des équations 15 à 19
- $Y_{i,j}$  est la valeur indiquée dans le i-ème ligne et le j-ème colonne Y du tableau A4.3

16. Calculer la nutation en longitude,  $\Delta\psi$  (en degrés),

$$\Delta\psi = \frac{\sum_{i=0}^n \Delta\psi_i}{36000000} \quad (30)$$

Où n est le nombre de lignes dans le tableau A4.3 (n est égal à 63 lignes dans le tableau).

17. Calculer la nutation en obliquité,  $\Delta\epsilon$  (en degrés),

$$\Delta\varepsilon = \frac{\sum_{i=0}^n \Delta\varepsilon_i}{36000000} \quad (31)$$

18. Calculer l'obliquité réelle de l'écliptique,  $\varepsilon$  (en degrés) :

19. Calculer l'obliquité moyenne de l'écliptique,  $\Delta\varepsilon_0$  (en secondes d'arc),

$$\varepsilon_0 = 84381,448 - 4680,93 U - 1,55 U^2 + 1999,25 U^3 - 1999,25 U^3 - 51,38 U^4 - 249,67 U^5 - 39,05 U^6 + 7,12 U^7 + 27,87 U^8 + 5,79 U^9 + 2,45 U^{10} \quad (32)$$

Où

$$U = \frac{JME}{10} \quad (33)$$

20. Calculer l'obliquité réelle de l'écliptique,  $\varepsilon$  (en degrés),

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_0}{3600} + \Delta\varepsilon \quad (34)$$

21. Calculez la correction d'aberration,  $\Delta T$  (en degrés) :

$$\Delta_\tau = \frac{20,4898}{3600 \times R} \quad (35)$$

22. Calculer la longitude apparente du soleil,  $\lambda$  (en degrés) :

$$\lambda = \theta + \Delta\psi + \Delta_\tau \quad (36)$$

23. Calculer le temps sidéral apparent à Greenwich à un moment donné,  $V$  (en degrés)

Calculer le temps sidéral moyen à Greenwich,  $V_0$  (en degrés),

$$V_0 = 280,46061837 + 360,98564736629 \times (JD - 2451545) - 0,000387933 \times JC^2 - \frac{JC^3}{38710000} \quad (37)$$

Limiter  $V_0$  à la fourchette de 0 à 360 degrés

24. Calculer le temps sidéral apparent à Greenwich,  $V$  (en degrés),

$$V = V_0 + \Delta\psi \times \cos(\varepsilon) \quad (38)$$

25. Calculer l'ascension droite du soleil géocentrique,  $\alpha$  (en degrés)

- Calculer l'ascension droite du soleil,  $\alpha$  (en radians),

$$\alpha = \text{Arc tan 2} \left( \frac{\sin \lambda \cos \varepsilon \tan \beta \sin \varepsilon}{\cos \lambda} \right), \quad (39)$$

Où Arctan2 est une fonction arc tangente qui est appliquée au numérateur et au dénominateur (au lieu de la division réelle) pour maintenir le quadrant correct du "  $\alpha$  " qui est dans l'intervalle de  $-\pi$  à  $\pi$ .

26. Calculer  $\alpha$  en degrés puis le limiter à la plage de 0 à 360 degrés

27. Calculer la déclinaison géocentrique du soleil,  $\delta$  (en degrés) :

$$\delta = \text{Arc sin}(\sin \beta \times \cos \varepsilon - \tan \beta - \sin \varepsilon \times \sin \lambda) \quad (40)$$

Où  $\delta$  est positif ou négatif si le soleil se trouve au nord ou au sud de l'équateur céleste, respectivement. Ensuite, changez  $\delta$  en degrés.

▪ Calculer l'angle horaire local de l'observateur, H (en degrés) :

$$H = v + \sigma - \alpha \quad (41)$$

Où  $\sigma$  est la longitude géographique de l'observateur, positive ou négative pour l'est ou l'ouest de Greenwich, respectivement.

Limiter H à la plage de 0 à 360

28. Calculer l'ascension droite du soleil topo centrique  $\alpha'$  (en degrés) :

"Topo centrique" signifie que la position du soleil est calculée par rapport à la position locale de l'observateur à la surface de la Terre.

▪ Calculer la parallaxe horizontale équatoriale du soleil,  $\xi$  (en degrés),

$$\xi = \frac{8.794}{3600 \times R} \quad (42)$$

Où R est calculé à l'étape 3.2.8.

▪ Calculer le terme u (en radians),

$$u = \text{Arc tan}(0,99664719 \times \tan \varphi) \quad (43)$$

Où  $\varphi$  est la latitude géographique de l'observateur, positive ou négative si elle se situe respectivement au nord ou au sud de l'équateur. Notez que le nombre 0,99664719 est égal à  $(1 - f)$ , où f est l'aplatissement de la Terre.

▪ Calculer le terme x,

$$x = \cos u + \frac{E}{6378140} \times \cos \varphi \quad (44)$$

Où E est l'altitude de l'observateur (en mètres). Notez que x est égal à  $\rho \times \cos \varphi'$  Où  $\rho$  est la distance de l'observateur au centre de la Terre, et  $\varphi'$  est la latitude géocentrique de l'observateur.

- Calculer le terme  $y$ ,

$$y = 0,99664719 \times \sin u + \frac{E}{6378140} \times \sin \varphi \quad (45)$$

Notez qu' $y$  est égal à  $\rho \times \sin \varphi'$ ,

- Calculer la parallaxe dans l'ascension droite du soleil,  $\Delta\alpha$  (en degrés),

$$\Delta\alpha = \text{Arc tan } 2 \left( \frac{-x \times \sin \xi \times \sin H}{\cos \delta - x \times \sin \xi \times \cos H} \right) \quad (46)$$

Puis changez  $\Delta\alpha$  en degrés en utilisant l'équation 12.

- Calculer l'ascension droite du soleil topo centrique  $\alpha'$  (en degrés),

$$\alpha' = \alpha + \Delta\alpha \quad (47)$$

- Calculer la déclinaison topo centrique du soleil,  $\delta'$  (en degrés),

$$\delta' = \text{Arc tan } 2 \left( \frac{(\sin \delta - y \times \sin \xi) \times \cos \Delta\alpha}{\cos \delta - x \times \sin \xi \times \cos H} \right) \quad (48)$$

29. Calculer l'angle horaire topo centrique local,  $H'$  (en degrés),

$$H' = H - \Delta\alpha. \quad (49)$$

30. Calculer l'angle zénithal topo centrique,  $H'$  (en degrés) :

- Calculer l'angle d'élévation topo centrique sans correction de la réfraction atmosphérique,  $e_0$  (en degrés),

$$e_0 = \text{Arc sin}(\sin \varphi \times \sin \delta + \cos \varphi \times \cos \delta \times \cos H') \quad (50)$$

- Calculer la correction de réfraction atmosphérique  $\Delta e$  (en degrés),

$$\Delta e = \frac{P}{1010} \times \frac{283}{273 + T} \times \frac{1,02}{60 \times \tan(e_0 + \frac{103}{e_0} + 5.11)} \quad (51)$$

Notez que  $\Delta e = 0$  lorsque le soleil est sous l'horizon.

où,

- $P$  est la pression locale moyenne annuelle (en millibars).
- $T$  est la température locale moyenne annuelle (en /C).
- $e_0$  est en degrés. Calculer l'argument de la tangente en degrés, puis convertir en radians si la calculatrice ou l'ordinateur le demande.

- Calculer l'angle d'élévation topo centrique,  $e$  (en degrés),

$$e = e_0 + \Delta e \quad (52)$$

- Calculer l'angle zénithal topo centrique,  $\theta$  (en degrés),

$$\theta = 90 - e \quad (53)$$

31. Calculer l'angle d'azimut topo centrique,  $\emptyset$  (en degrés) :

- Calculer l'angle d'azimut topo centrique des astronomes,  $\Gamma$  (en degrés),

$$\Gamma = \text{Arc tan } 2\left(\frac{\sin H'}{\cos H' \times \sin \varphi - \tan \delta \times \cos \varphi}\right) \quad (54)$$

Changez  $\Gamma$  en degrés à l'aide de l'équation 12, puis limitez-le à la plage de 0 à 360 à l'aide de l'étape 3.2.6. Notez que  $\Gamma$  est mesuré vers l'ouest à partir du sud.

Calculer l'angle d'azimut topo centrique,  $\Phi$  pour les utilisateurs du rayonnement solaire (en degrés)

$$\Phi = \Gamma + 180, \quad (55)$$

Limitez  $\Phi$  à la plage de 0 à 360 en utilisant l'étape 3.2.6. Notez que  $\Phi$  est mesuré vers l'est à partir du nord.

32. Calculer l'angle d'incidence pour une surface orientée dans n'importe quelle direction,  $I$  (en degrés) :

$$I = \text{Arc cos}(\cos \theta \times \cos \omega + \sin \omega + \sin \theta \times \cos(\Gamma - \gamma)), \quad (56)$$

Où

- $\omega$  : est l'angle d'inclinaison de la surface mesurée à partir du plan horizontal.
- $\gamma$  : est l'angle de rotation de l'azimut de la surface, mesuré du sud à la projection de la normale à la surface sur le plan horizontal, positif ou négatif si orienté respectivement vers l'ouest ou l'est à partir du sud.

## Annexe 4 : Équation des modèles de calcul du rayonnement solaire

### 1- Model de BIRD

Modèle de calcul du rayonnement solaire sur un plan horizontal

#### 1. Rayonnement direct

Le rayonnement direct normal est donné par

$$I_n = 0,975 \times E_o \times I_{sc} \times \tau_r \times \tau_0 \times \tau_g \times \tau_w \times \tau_a \quad (57)$$

Avec :

$I_{sc}$  : Constante solaire : 1367 W/m<sup>2</sup>

$\tau_r$  (sans diemention) : est le coefficient de transmission après la diffusion moléculaire de Rayleigh ;

$\tau_0$  (sans diemention) : coefficient de transmission après la diffusion par les gaz uniforme ;

$\tau_g$  (sans diemention) : coefficient de transmission après absorption par l'ozone ;

$\tau_w$  (sans diemention) : coefficient de transmission après absorption par la vapeur d'eau ;

$\tau_a$  (sans diemention) : coefficient de transmission après la diffusion par les aérosols,

$E_o$  (sans diemention) : est le facteur de correction de l'excentricité de l'orbite terrestre et est sans dimension, elle est donnée comme suit :

$$E_o = 0,0011 + 0,34221 \times \cos \Gamma \times 0,0128 \times \sin \Gamma + 0,00719 \times \cos 2 \times \Gamma + 0,00077 \times \sin 2 \times \Gamma \quad (58)$$

Où l'angle du jour  $\Gamma$  (radians) est donné par :

$$\Gamma = 2\pi \times \left(\frac{N - 1}{365}\right) \quad (59)$$

$N$  est le nombre de jour de l'année, allant 1er janvier au 31 décembre (1 à 365),

## 2. Formule de calculs des coefficients de transmission

### ➤ Absorption par l'ozone

Le coefficient de transmission après absorption par l'ozone est donné par la relation suivante :

$$\tau_o = 1 - \alpha_o \quad (60)$$

Où  $\alpha_o$  est le coefficient d'absorption par la couche d'ozone, sa quantification peut être effectuée par la relation suivante :

$$\alpha_o = 0,1611 \times U_3 \times (1,0 + 139,48 \times U_3)^{-0,3035} - 0,002715 \times U_3 \times (1 + 0,044 \times U_3 + (U_3)^2)^{-1} \quad (61)$$

$U_3$  (cm) : est la longueur de parcours optique relative de l'ozone à la température,

Absorption par la vapeur d'eau

Le coefficient de transmission après absorption du rayonnement solaire par la vapeur d'eau est donné comme suit :

$$\tau_w = 1 - 2,4959 \times U_1 \times [(1,0 + 139,48 \times U_1)^{-0,6828} + 0,002715 \times U_1]^{-1} \quad (62)$$

$U_1$  (cm): est la longueur du trajet optique relatif corrigé de la pression des précipités d'eau,

Absorption par les gaz

Dans ce modèle, le coefficient de transmission après absorption par les gaz est donné par l'expression suivante :

$$\tau_g = \exp[-0,0127 \times m_a^{0,26}] \quad (63)$$

### ➤ Diffusion de Rayleigh

Le coefficient de transmission après la diffusion moléculaire est donné par la relation suivante :

$$\tau_r = \exp[-0,0903 \times m_a^{0,84} \times (1 + m_a - m_a^{1,01})] \quad (64)$$

### ➤ Diffusion par les aérosols

Dans ce modèle, le coefficient de transmission après la diffusion par les aérosols concerne uniquement les deux longueurs d'onde ( $\mu\text{m } 38,0=\lambda$  et  $\mu\text{m } 50,0=\lambda$ ), c'est les longueurs d'onde



où il existe un minimum d'absorption par l'ozone, il est donné par :

$$\tau_a = \exp[-K_a^{0,873} \times m_a^{0,9108} \times (1 + K_a - K_a^{0,7808})] \quad (65)$$

Où

$$K_a = 0,2758 \times K_{a\lambda/\lambda=0,38\mu m} + 0,35 \times K_{a\lambda/\lambda=0,8\mu m} \quad (66)$$

$$K_{a\lambda} = \beta_A \times \lambda^{-1,3} \text{ Pour } \lambda_1 = 0,38 \mu m \text{ et } \lambda_2 = 0,8 \mu m \quad (67)$$

Les valeurs de  $\beta_A$  sont présentés dans le Tableau 1 (Annexe 1)

➤ Rayonnement diffus

$$I_d = I_{da} + I_{dr} + I_{dm} \quad (68)$$

Où

$I_{dr}$  ( $w/m^2$ ) est l'irradiation diffuse provenant de la diffusion de Rayleigh;

$I_{da}$  ( $w/m^2$ ) est l'irradiation diffuse provenant de la diffusion par les aérosols;

$I_{dm}$  ( $w/m^2$ ) est l'irradiation diffuse issue du phénomène de multi réflexion terre- atmosphère,

Les éclaircissements dus au rayonnement diffus après diffusion par les aérosols, par les molécules d'air et la multi réflexion sont donnés par les relations ci-après,

➤ Rayonnement diffus issu des aérosols

$$I_{da} = 0,79 \times I_{sc} \times \cos \theta_z \times \tau_0 \times \tau_g \times \tau_w \times \tau_{aa} \times F_c \times (1 - \tau_{as}) / (1 - m_a + m_a^{1,02}) \quad (69)$$

➤ Rayonnement solaire après diffusion moléculaire

$$I_{dr} = 0,79 \times I_{sc} \times \tau_0 \times \tau_g \times \tau_w \times \tau_{aa} \times 0,5 \times (1 - \tau_r) / (1 - m_a + m_a^{1,02}) \quad (70)$$

Avec  $\tau_{aa}$  et  $\tau_{as}$  sont respectivement les coefficients de transmission après absorption et diffusion du rayonnement solaire par les aérosols,

$$\tau_{aa} = 1 - (1 - \omega_0) \times (1 - m_a + m_a^{1,06}) \times (1 - \tau_a) \quad (71)$$

$\omega_0$  (sans dimension) est la fraction albédo à diffusion unique de l'énergie incidente diffusée jusqu'à l'atténuation totale par les aérosols et Bird et Hallström ont recommandé une valeur de 0,9 pour

et dans ce modèle,  $\tau_{as}$ , le coefficient de transmission du rayonnement solaire après diffusion par les aérosols est calculé par la relation suivante :

$$\tau_{as} = \frac{\tau_a}{\tau_{aa}} \quad (72)$$



➤ Rayonnement issu du phénomène de multi réflexion terre atmosphère

L'irradiation diffuse issue du phénomène de multi-réflexion est donnée par l'expression suivante :

$$I_{dm} = (I_h \times \sin h + I_{dr} + I_a) \times \rho_g \times \rho'_g / (1 - \rho_g \times \rho'_a) \quad (73)$$

Où  $I_h$  ( $W/m^2$ ) est le rayonnement direct sur un plan horizontal,

$h$  est l'altitude du soleil en degrés,

$\rho_g$  : est l'albédo terrestre (sans dimension)

$\rho'_a$  (sans dimension) : est l'albédo du ciel clair donné par l'équation suivante:

$$\rho'_a = 0,0685 + (1 - F_c) \times (1 - \tau_{as}) \quad (74)$$

$F_c$  (sans dimension) est la fraction de la diffusion vers l'avant par rapport à la diffusion totale et on considère qu'elle est de 0,84

$(1 - F_c)$  : est la fraction albédo de rétrodiffusion

Par conséquent, le deuxième terme à droite de cette équation représente l'albédo d'un ciel sans nuage dû à la présence d'aérosols, alors que le premier terme représente l'albédo de l'air pur,

### 3. Rayonnement global

Ainsi, pour ce modèle, le rayonnement global sur un plan horizontal est calculé comme suit

$$I_g = I_h + I_d \quad (75)$$

$I_h$  ( $W/m^2$ ) est le rayonnement direct calculé sur un plan horizontal, et  $I_d$  ( $W/m^2$ ) comme étant la somme des rayonnement diffusé par les aérosols, les molécules d'air et le phénomène de multi réflexions,

## 2- Model RETS2v5

Le modèle RETS2v5 calcul le rayonnement dans les deux bandes du spectre solaire (0,29-0,70  $\mu m$ ) et (0,70-4,0  $\mu m$ )

Input du modeler RETS2v5,

Rayonnement extraterrestre  $G_{sc} = 1366,1 W/m^2$

Angle zénithal  $\theta_z$

Angle zénithal ( $\theta_z$ ), Pression Local (P), Albédo du sol ( $\rho_g$ ),

Coefficient d'Angstrom\_exponent (alpha)

Coefficient de turbidité d'Ångström (bêta)

Quantité totale de vapeur d'eau (atm,cm)

Quantité totale de dioxyde de nitrogène NO2 (atm,cm)



Albédo du sol

Output : GHI, DNI et DHI

Procédure de prédiction du rayonnement solaire

1- Calcul des coefficients de la masse d'air pour l'extinction des aérosols

$$m_a = (\cos(\theta_z) + 0,16851 \times (\theta_z \times 180/\pi)^{0,18198}) / (95,318 - \theta_z \times 180/\pi)^{1,9542}^{-1} \quad (76)$$

$$m_w = (\cos(\theta_z) + 0,10648 \times (\theta_z \times 180/\pi)^{0,11423}) / (93,781 - \theta_z \times 180/\pi)^{1,9203}^{-1} \quad (77)$$

$$m_n = (\cos(\theta_z) + 1,1212 \times (\theta_z \times 180/\pi)^{1,6132}) / (111,55 - \theta_z \times 180/\pi)^{3,2629}^{-1} \quad (78)$$

$$m_o = (\cos(\theta_z) + 1,0651 \times (\theta_z \times 180/\pi)^{0,6379}) / (101,8 - \theta_z \times 180/\pi)^{2,2694}^{-1} \quad (79)$$

$$m_r = (\cos(\theta_z) + 0,48353 \times (\theta_z \times 180/\pi)^{0,095846}) / (101,8 - \theta_z \times 180/\pi)^{1,754}^{-1} \quad (80)$$

$$m'_R = (P/1013,25) \times ((\cos(\theta_z) + 0,48353 \times (\theta_z \times 180/\pi)^{0,095846}) / (96,741 - \theta_z \times 180/\pi)^{1,754})^{-1} \quad (81)$$

2- Calcul des coefficients d'atténuation dans le spectre visible

Coefficient de transmission après la diffusion moléculaire de Rayleigh

$$T_{R1} = ((1 + 1,8169 \times m'_R - 0,033454 \times m'^2_R) / (1 + 2,063 \times m'_R + 0,31978 \times m'^2_R)) \quad (82)$$

Coefficient de transmission après la diffusion par les gaz uniformes

$$T_{g1} = (1 + 0,95885 \times m'_R + 0,012871 \times m'^2_R) / (1 + 0,96321 \times m'_R + 0,015455 \times m'^2_R) \quad (83)$$

Coefficient de transmission après absorption par l'ozone

$$T_{O1} = (1 + f_1 \times m_o + f_2 \times m_o^2) / (1 + f_3 \times m_o) \quad (84)$$

Avec :

$$f_1 = \mu_0 \times (10,979 - 8,5421 \times \mu_0) / (1 - 2,0115 \times \mu_0 + 40,189 \times \mu_0^2); \quad (85)$$

$$f_2 = \mu_0 \times (-0,027589 - 0,005138 \times \mu_0) / (1 - 2,4857 \times \mu_0 + 13,942 \times \mu_0^2); \quad (86)$$

$$f_3 = \mu_0 \times (-10,995 - 5,5001 \times \mu_0) / (1 - 1,6784 \times \mu_0 + 42,406 \times \mu_0^2); \quad (87)$$

Coefficient de transmission par l'NO<sub>2</sub>

$$T_{n1} = \text{Min}[1, [1 + g_1 \times m_w + g_2 \times m_w^2] / (1 + g_3 \times m_w)] \quad (88)$$

Avec :

$$g_1 = (0,17499 + 41,654 \times \mu_n - 2146,4 \times \mu_n) / (1 + 22295 \times \mu_n^2) \quad (89)$$

$$g_2 = \mu_n \times (-1,2134 + 59,324 \times \mu_n) / (1 + 8847,8 \times \mu_n^2) \quad (90)$$

$$g_3 = \mu_0 \times (0,17499 - 61,658 \times \mu_n + 9196,4 + \mu_n^2) / (1 + 74109 \times \mu_0^2); \quad (91)$$

Coefficient de transmission après absorption par la vapeur d'eau

$$T_{w1} = (1 + h_1 m_w \times \mu_n) / (1 + h_2 m_w) \quad (92)$$

$$h_1 = m_w \times (0,065445 + 0,00029901 \times m_w) / (1 + 1,2728 \times m_w) \quad (93)$$

$$h_2 = m_w \times (0,065687 + 0,0013218 \times m_w) / (1 + 1,2728 \times m_w) \quad (94)$$

Coefficient de transmission après la diffusion par les aérosols,

$$T_{as1} = \exp(m_a \times 0,92 \times t_{a1}) \quad (95)$$

Coefficient de transmission par les aérosols ( $T_{a1}$ ),

$$t_{a1} = \beta_1 \lambda_{e1}^{-\alpha_1} \quad (96)$$

$$T_{a1} = \exp(-m_a \times t_{a1})$$

Avec

(97)

$$\lambda_{e1} = (d_0 - d_1 \mu_a + d_2 \mu_a^2) / (1 + d_3 \mu_a^2) \quad (98)$$

$$d_0 = 0,57664 - 0,024743 \alpha_1 \quad (99)$$

$$d_1 = (0,093942 - 0,2269 \alpha_1 + 0,12848 \alpha_1^2) / (1 + 0,6418 \alpha_1) \quad (100)$$

$$d_2 = (-0,093819 + 0,36668 \alpha_1 - 0,12775 \alpha_1^2) / (1 - 0,11651 \alpha_1) \quad (101)$$

$$d_3 = \alpha_1 (0,15232 - 0,087214 \alpha_1 + 0,012664 \alpha_1^2) / (1 - 0,90454 \alpha_1 + 0,26167 \alpha_1^2) \quad (102)$$

Avec  $\alpha_1 = \alpha A$  et  $\beta_1 = \beta A$  (voir Tableau 1 (Annexe 1))

$B_{R1}$  Et  $B_{R2}$  sont les fractions de diffusion vers l'avant pour l'extinction de Rayleigh,

$$B_{Ri} = 0,5 \times (0,89013 - 0,0049558 + 0,000045721 m_R^2) \quad (103)$$

Le facteur de diffusion vers l'avant de l'aérosol,  $B_a$ ,

$$B_a = 1 - (0,6931 - 1,8326 \times \cos(\theta_z))$$

(  
104)

Facteur de correction de la diffusion des aérosols

(105)

$$F_1 = (g_0 + g_1 \tau_{a1}) / (1 + g_2 \tau_{a1})$$

$$g_0 = (3,715 + 0,368 m_a + 0,036294 m_a^2) / (1 + 0,0009391 m_a^2) \quad (106)$$

$$g_1 = (-0,164 - 0,72567 m_a + 0,20701 m_a^2) / (1 + 0,0019012 m_a^2) \quad (107)$$

$$g_2 = (-0,052288 + 0,31902 m_a + 0,17871 m_a^2) / (1 + 0,0069592 m_a^2) \quad (108)$$

Albedo du ciel dans le spectre visible du rayonnement soleil

$$\rho_{s1} = [0,13363 + 0,00077358 \alpha_1 + \beta_1 (0,37567 + 0,22946 \alpha_1) / (1 - 0,10832 \alpha_1)] / [1 + \beta_1 (0,84057 + 0,68683 \alpha_1) / (1 - 0,08158 \alpha_1)] \quad (109)$$

### 3- Calcul des coefficients de transmission dans le spectre de l'infra rouge

Coefficient de transmission après la diffusion moléculaire de Rayleigh

$$T_{R2} = ((1 - 0,010394 \times m'_R) / (1 - 0,00011042 \times m'^2_R)) \quad (110)$$

Coefficient de transmission après la diffusion par les gaz uniforme

(111)

$$T_{g2} = (1 + 0,27284 m'_R - 0,00063699 \times m'^2_R) / (1 + 0,30306 \times m'^2_R)$$

$T_{O2} = 1$  : Coefficient de transmission après absorption par l'ozone

$T_{n2} = 1$  : Coefficient de transmission par l' $\text{NO}_2$

Coefficient de transmission après absorption par la vapeur d'eau

$$T_{w2} = (1 + C_1 \times m_w + C_2 m_w^2)/(1 + C_3 \times m_w + C_4 m_w^2) \quad (112)$$

$$C_1 = w(19,566 - 1,6506w - 1,0672w^2)/(1 + 5,4248w + 1,16005w^2) \quad (113)$$

$$C_2 = w(0,50158 - 0,14732w + 0,047584w^2)/(1 + 1,1811w + 1,0699w^2) \quad (114)$$

$$C_3 = w(21,286 - 0,39232w + 1,2692w^2)/(1 + 4,8318w + 1,412w^2) \quad (115)$$

$$C_4 = w(0,70992 - 0,23155w + 0,096514w^2)/(1 + 0,44907w + 0,75425w^2) \quad (116)$$

Coefficient de transmission après la diffusion par les aérosols,

$$T_{as2} = \exp(m_a \times 0,84 \times t_{a2}) \quad (117)$$

Coefficient de transmission par les aérosols ( $T_{a2}$ ),

$$t_{a2} = \beta_1 \lambda_{e1}^{-\alpha_1} \quad (118)$$

$$T_{a2} = \exp(-m_a \times t_{a1}) \quad (119)$$

Avec

$$\lambda_{e2} = (e_0 - e_1 \mu_a + d_2 \mu_a^2)/(1 + e_3 \mu_a^2) \quad (120)$$

$$e_0 = (1,183 - 0,022989 \alpha_2 + 0,020829 \alpha_2^2)/(1 + 0,11133 \alpha_2) \quad (121)$$

$$e_1 = (-0,50003 - 0,18329 \alpha_2 + 0,23835 \alpha_2^2)/(1 + 1,6756 \alpha_2) \quad (122)$$

$$e_2 = (-0,50001 + 1,1414 \alpha_2 + 0,0083589 \alpha_2^2)/(1 + 11,168 \alpha_2) \quad (123)$$

$$e_3 = (-0,70003 - 0,73587 \alpha_2 + 0,51509 \alpha_2^2)/(1 + 4,7665 \alpha_2) \quad (124)$$

$B_{R2}$  Et  $B_a$  sont les fractions de diffusion vers l'avant pour l'extinction de Rayleigh dans l'infra rouge,

$$B_{Ri} = 0,5 \quad (125)$$

Le facteur de diffusion vers l'avant de l'aérosol,  $B_a$ ,

$$B_a = 1 - (0,6931 - 1,8326 \times \cos(\theta_z)) \quad (126)$$

Facteur de correction de la diffusion des aérosols dans l'infrarouge (127)

$$F_2 = (h_0 + h_1 \tau_{a2})/(1 + h_2 \tau_{a2})$$

$$h_0 = (3,4352 + 0,65267 m_a + 0,00034328 m_a^2)/(1 + 0,034388 m_a^{1,5}) \quad (128)$$

$$h_1 = (1,231 - 1,63853 m_a + 0,20667 m_a^2)/(1 + 0,1451 m_a^{1,5}) \quad (129)$$

$$h_2 = (0,8889 - 0,55063 m_a + 0,50152 m_a^2)/(1 + 0,14865 m_a^{1,5}) \quad (130)$$

Albédo du ciel dans le spectre de l'infra rouge du rayonnement soleil

$$\rho_{s2} = [0,010191 + 0,00085547 \alpha_2 + \beta_2(0,14618 + 0,062758 \alpha_2)]/(1 - 0,19402 \alpha_2) / [1 + \beta_2(0,58101 + 0,17426 \alpha_2)/(1 - 0,17586 \alpha_2)] \quad (131)$$

#### 4- Calculs du rayonnement direct, diffus et global

Pour chacune des deux gammes du spectre soleil i, le rayonnement normal direct  $E_{bni}$ , ou DNI est obtenu à partir du produit des coefficients de transmittances,



$$E_{bni} = T_{Ri} \times T_{gi} \times T_{oi} \times T_{ni} \times T_{wi} \times T_{ai} \times E_{0ni} \quad (132)$$

Le rayonnement direct normal total dans tout le spectre solaire (0,29-0,70  $\mu\text{m}$ ) et (0,70-4,0  $\mu\text{m}$ ) est simplement obtenu comme la somme des composantes ;

$$E_{bn} = E_{bn1} + E_{bn2} \quad (133)$$

Rayonnement diffus et global sans considérer les effets de réflexion (albedo)

$$E_{dpi} = T_{oi} \times T_{gi} \times T_{oni} \times T_{owi} [B_{Ri} (1 - T_{Ri}) T_{ai}^{0,25} + B_{afi} T_{oi} (1 - T_{ai}^{0,25})] \times E_{oi} \quad (134)$$

$$\text{Ou } E_{oi} = E_{oin} \times \cos(\theta_z) \quad (135)$$

Ou  $\theta_z$  est l'angle zénithal

Le rayonnement diffus et globale incidente sur une surface horizontale est finalement donné comme :

$$E_b = E_{bn} \cos(\theta_z), \quad (136)$$

$$E_{dp} = E_{dp1} + E_{dp2}, \quad (137)$$

$$E_{gp} = E_b + E_{dp} \quad (138)$$

Rayonnement diffus et global avec considération des effets de réflexion (albedo)

L'albédo du sol ( $\rho_g$ ), considérer dans ce modèle fait référence à une moyenne sur une grande zone de 5 à 50 km de rayon autour du site examiné. Pour chaque bande, l'albédo du ciel,  $\rho_{si}$ , est obtenu en fonction de  $\alpha_i$  et  $\beta_i$  (coefficient angström turbidité coefficient (sans dimension)), et la composante diffuse rétrodiffusée,  $E_{ddi}$ , est obtenue en considérant de multiples réflexions entre le sol et l'atmosphère,

$$E_{ddi} = \rho_{gi} \times \rho_{si} \times (E_{bi} + E_{dpi}) / (1 - \rho_{gi} \times \rho_{si}) \quad (139)$$

où  $E_{bi} = E_{bni} \cos(\theta_z)$ ,

Enfin, le rayonnement diffuse totale dans chaque bande du spectre solaire est

$E_{di} = E_{dpi} + E_{ddi}$ , de sorte que le rayonnement diffus dans toute la gamme du spectre considéré est obtenu comme :  $E_d = E_{d1} + E_{d2}$  et avec le rayonnement global total dans les deux bandes du spectre solaire comme  $E_g = E_b + E_d$ ,



### 3- Model 3 : MCA2

Input

Rayonnement extraterrestre  $G_{sc} = 1353 \text{ W/m}^2$

Angle zénithal ( $\theta_z$ ), Pression Local (P), Albedo du sol (albedo),

Coefficient d'Angstrom\_exponent ( $\alpha$ )

Coefficient de turbidité d'Ångström (bêta)

Quantité totale de vapeur d'eau  $wv$  (atm,cm)

Output : GHI, DNI et DHI

Procédure de prédiction du rayonnement solaire

1- Calcul de la masse d'air optique  $m_r$

$$m_r = 35 / ((1224 \times \cos(\theta_z)^2 + 1)^{0,5}) \quad (140)$$

2- Calcul du coefficient de Transmission après absorption par l'ozone  $T_o$

$$\tau_o = 1 - ((0,1082X_1)/(1 + 13,86X_1)^{0,805} + ((0,00658 \times X_1)/(1 + 10,36 X_1^3) + ((0,002118 X_1)/(1 + 0,0042 X_1 + 3,23^{-6} X_1^2))) \quad (141)$$

$$X_1 = m_r \alpha_o \quad (142)$$

avec  $\alpha_o$  coefficient d'absorption par la couche d'ozone

$\alpha_o = 0,35 \text{ cm}$  (Valeur fixée à par #Davies et Mckay pour le modèle MCA2)

3- Calcule du coefficient de Transmission de Rayleigh

$$T_r = m_r$$

Tableau 1 : Constantes empiriques du coefficient de transmission de Rayleigh en fonction du  $m_r$  (Davies and McKay, 1982)

mrs	0,5	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	3
Tr(R)	0,9385	0,8973	0,883	0,8696	0,8572	0,8455	0,8344	0,7872
mrs	3,5	4	4,5	5	5,5	6	10	30
Tr(R)	0,7673	0,7493	0,7328	0,7177	0,7037	0,6907	0,6108	0,4364

$T_r$  est obtenus par une interpolation linéaire avec les composant  $Tr_s$  et  $mrs$  du Tableau 1

4- Calcul du coefficient de Transmission après la diffusion par les aérosols  $T_a$

$$T_a = \exp(-m_r \times ta) \quad (143)$$

$$ta = \beta \times (0,38^{-0,2758 \alpha} + 0,5^{-35 \alpha}) \quad (144)$$

$$a_w = 0,29X_2 / (((1 + 14,15X_2)^{0,635}) + 0,5925X_2) \quad (145)$$

$$X_2 = m_r U_w \quad (146)$$

$$U_w = m_r W_v \times (P/P_0)^{0,75} \quad (147)$$

5- Calcul du rayonnement direct normal (DNI mac2)

$$\text{DNI mc2} = (E_o \times G_{sc} \times T_o T_r - A_w) \times T_a \quad (148)$$

Calcul du rayonnement diffus provenant de la diffusion de Rayleigh ( DR)

$$DR = E_o \times G_{sc} \times \cos(\text{thetaZ}) \times T_o \times (1 - T_r)/2 \quad (149)$$

6- Calcul du rayonnement diffus provenant de la diffusion par les aérosols

$$DA = E_o \times G_{sc} \times \cos(\text{thethaz}) \times (T_o \times T_r - A_w) \times (1 - T_a) \times 0,75 \times f \quad (150)$$

Thetha'	0	25,8	36,9	45,6	53,1	60
f	0,92	0,91	0,89	0,86	0,83	0,78

f est une constante qui est obtenue par interpolation en fonction de  $\theta_z$  Angle zénithal

Avec  $\theta_z$  Angle zénithal et  $\text{Thetha}' = \theta_z \times 180/\pi$

7- Rayonnement diffus horizontal

$$T_{aaa} = 0,95^{1,66}$$

$$C1 = 0,0685 + (1 - T_{aaa}) \times 0,75 \times (1 - 0,83)$$

$$GHI mca2 = (DNI mca2 \times \cos(\theta_z) + DR + DA)/(1 - C1 \times albedo) \quad (151)$$

8- Rayonnement Global

$$GHI mac2 = (EBnmac \times \cos(\theta_z) + DR + DA)/(1 - C1 \times albedo) \quad (152)$$